

Persönlich danken möchte ich Achim Raschka für seine tatkräftige Unterstützung und seine rigorose Nachbearbeitung der Texte und allen, die mich bei diesem Buch unterstützt haben. Und nicht zuletzt eine kleine Hommage an eine Person, die über eine Bemerkung von mir über den Sternenhimmel sagte: »Ach, jetzt werden wir wohl wieder romantisch ...«

# Sonnensystem und Sonne

## Sonnensystem

---

Das Sonnensystem, auch *Solarsystem* oder manchmal auch *unser Planetensystem* genannt, besteht aus der Sonne mit ihren Planeten, Monden, Kleinplaneten, Kometen, Kleinkörpern wie den Meteoroiden, sowie der Gesamtheit aller Gas- und Staubteilchen, die durch die Anziehungskraft der Sonne zu einem System zusammengehalten werden. Dem Planetensystem der Sonne gehört auch unsere ➔Erde an.

### Aufbau

Im Zentrum des Sonnensystems befindet sich als Zentralstern die Sonne mit etwa 1,39 Millionen Kilometern Durchmesser, in der fast 99,9 % der Gesamtmasse des Systems konzentriert sind.

Um die Sonne herum bewegen sich hauptsächlich die Planeten. Im Allgemeinen spricht man von den *neun Planeten*, dem im Mittel am weitesten entfernten Planeten ➔Pluto wird jedoch seit der Entdeckung anderer ➔Plutinos (ähnlich große Objekte mit vergleichbaren Bahneigenschaften) der Planetenstatus mehr und mehr aberkannt. 2003 wurde ein Objekt entdeckt, das größer als Pluto ist und sich am äußersten Rand unseres Sonnensystems befindet: ➔2003 UB<sub>313</sub>. Sowohl die Entdecker als auch die NASA stufen das Objekt aufgrund seiner Größe als Planeten ein; die IAU hat jedoch in einer Erklärung mitgeteilt, dass dieses Objekt zumindest bis zu einer neuen, klaren Definition für Planeten, welche im Sommer 2006 beschlossen werden soll, nicht als Planet anerkannt wird.

Weitere Bestandteile des Sonnensystems sind Millionen von ➔Asteroiden (auch Planetoiden oder Kleinplaneten genannt) und ➔Kometen, die vorwiegend in drei Zonen des Sonnensystems anzutreffen sind: dem ➔Asteroidengürtel, dem ➔Kuipergürtel und der ➔Oort'schen Wolke.

Der Sonne am nächsten befinden sich die *inneren*, ➔erdähnlichen Planeten ➔Merkur (Abstand zur Sonne  $57,9 \times 10^6$  km, beziehungsweise 0,39 AE), ➔Venus ( $108,2 \times 10^6$  km, 0,72 AE), Erde ( $149,6 \times 10^6$  km, 1 AE) und ➔Mars ( $227,9 \times 10^6$  km, 1,52 AE). Ihr Durchmesser beträgt zwischen 4.878 km und 12.756 km, ihre Dichte zwischen  $3,95 \text{ g/cm}^3$  und  $5,52 \text{ g/cm}^3$ .

Zwischen Mars und ➔Jupiter befindet sich der so genannte ➔Asteroidengürtel, eine Ansammlung von *Kleinplaneten*. Die meisten dieser As-

Sonne	
Innere Planeten	(⇒ <i>Vulkanoiden</i> )
	1. ⇒ <b>Merkur</b>
	2. ⇒ <b>Venus</b>
	Aten-Typ Asteroiden
	3. ⇒ <b>Erde</b> ⇒ Mond
	⇒ Erdbahnkreuzer
	Apollo-Typ Asteroiden
	4. ⇒ <b>Mars</b> ⇒ Phobos, ⇒ Deimos
	Mars-Trojaner
	Amor-Typ Asteroiden
⇒ Asteroidengürtel	⇒ Ceres, ⇒ Pallas, ⇒ Juno, ⇒ Vesta
Äußere Planeten	5. ⇒ <b>Jupiter</b> ⇒ Io, ⇒ Europa, ⇒ Ganymed, ⇒ Kallisto
	Jupiter-Trojaner
	6. ⇒ <b>Saturn</b> ⇒ Tethys, ⇒ Dione, ⇒ Rhea, ⇒ Titan, ⇒ Iapetus
	⇒ Zentauren      Chiron
	7. ⇒ <b>Uranus</b> Miranda, ⇒ Ariel, ⇒ Umbriel, ⇒ Titania, ⇒ Oberon
	8. ⇒ <b>Neptun</b> ⇒ Triton, Nereid
	9. ⇒ <b>Pluto</b> ⇒ Charon
Transneptunische Objekte, ⇒ Kuipergürtel	⇒ Plutinos      Ixion, ⇒ Orcus
	⇒ Quaoar, Varuna, ⇒ 2003 UB <sub>313</sub>
	⇒ Sedna
⇒ Oortsche Wolke	

Objekte unseres Sonnensystems (vgl. Farbtafeln Abb. 133)

teroiden sind nur wenige Kilometer groß, und nur wenige haben einen Durchmesser von 100 km oder mehr. ⇒ Ceres ist mit etwa 960 km der größte dieser Körper. Ihre Bahnen sind teilweise stark elliptisch, einige kreuzen sogar die Merkur- (Icarus) beziehungsweise Uranusbahn (Chiron).

Zu den *äußeren Planeten* zählen die ⇒ *Gasriesen* ⇒ Jupiter ( $778,3 \times 10^6$  km, 5,2 AE), ⇒ Saturn ( $1,429 \times 10^9$  km, 9,53 AE) sowie die Planeten ⇒ Uranus ( $2,875 \times 10^9$  km, 19,2 AE) und ⇒ Neptun ( $4,504 \times 10^9$  km, 30,1 AE) mit Dichten zwischen  $0,7 \text{ g/cm}^3$  und  $1,66 \text{ g/cm}^3$  sowie ⇒ Pluto ( $5,900 \times 10^9$  km, 39,5 AE).

Seit den 1990ern hat man mehr als 500 Objekte gefunden, die sich jenseits der Neptunbahn bewegen. Diese Objekte bilden den ⇒ Kuipergürtel, der sich in einem Abstand von 6–7,5 Milliarden km (30–50 AE) zur Sonne befindet und ein Reservoir für die Kometen mit mittleren Umlaufperioden ist. Die Objekte dieser Zone sind wahrscheinlich nahezu unveränderte Überbleibsel aus der Entstehungsphase des Sonnensystems, man nennt sie deshalb auch Planetesimale.

Jenseits des Kuipergürtels befindet sich bis zu einem Abstand von etwa 1,5 Lichtjahren (etwa 100.000 AE) die ⇒ Oortsche Wolke. Man vermutet, dass aus dieser durch Gravitationsstörungen gelegentlich vorbeiziehender Sterne Körper herausgerissen werden und als langperiodische Kometen in die inneren Bereiche des Sonnensystems gelangen. Einige dieser Kometen verbleiben dann auf stark elliptischen Bahnen in der Nähe der Sonne, andere werden von den Planeten, insbesondere von Jupiter, gestört und abgelenkt, so dass sie aus dem Sonnensystem katapultiert werden oder auf Planeten oder in die Sonne stürzen.

Den Rand unseres Sonnensystems bildet die Heliopause, die Grenzschicht zwischen ⇒ Sonnenwind und interstellarem Medium. Man vermutet sie in einer Entfernung von ungefähr 150 AE, das dem 150fachen des Abstands Erde-Sonne oder dem 4fachen von Pluto-Sonne entspricht, der genaue Abstand ist jedoch bis heute nicht bekannt.

Die inneren Planeten sowie Jupiter und Saturn waren schon in der Antike bekannt. Sie wurden von den Römern als Götter betrachtet und sind nach diesen benannt. Uranus, Neptun und Pluto wurden zwischen 1781 und 1930 entdeckt und ebenfalls nach römischen Göttern benannt.

Innerhalb der von den einzelnen Planeten beherrschten Gravitationsfelder – ihrer Hill-Sphäre – befinden sich, außer bei Merkur und Venus, kleinere Himmelskörper als umlaufende Begleiter. Nach dem altbekannten ⇒ Mond der Erde werden sie analog ebenfalls als Monde, aber auch gleichbedeutend für Begleiter als Trabanten oder Satelliten bezeichnet. Sie sind bis auf den Erdmond und den Plutomond ⇒ Charon wesentlich kleiner als ihr Planet. Eine definitiv untere Grenzgröße, ab der man nicht mehr von einem Mond spricht, wurde wie bei den Planeten bisher noch nicht offiziell festgelegt.

Da astronomische Dimensionen für die meisten Menschen schwer vorstellbar sind, ist ein maßstabsgerecht verkleinertes Modell unseres Sonnensystems hilfreich, um sich die Größenverhältnisse und Distanzen der Objekte unseres Sonnensystems zu veranschaulichen.

### Das Sonnensystem im Milchstraßensystem

Die Sonne mit ihren Begleitern ist, wie alle Sterne, Teil eines Sternsystems. Sie ist mit mindestens 100 Milliarden (manche Schätzungen gehen bis 400 Milliarden) weiteren Sternen ein Mitglied des Milchstraßensystems, einer Spiralgalaxie mit einem Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren. Das Sonnensystem befindet sich zwischen zwei der spiralförmigen Sternkonzentrationen, zwischen dem Perseusarm und dem Sagittariusarm, in einer

lokalen Abzweigung, dem Orionarm. Es ist etwa 26.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt und umkreist es mit einer Geschwindigkeit von rund 220 km/s binnen etwa 230 Millionen Jahren, einem *galaktischen Jahr*.

Die Lage der mittleren Bahnebene der Planeten des Sonnensystems entspricht nicht der Äquatorebene der Galaxis, sondern ist sehr stark dagegen geneigt. Der Nordpol der Erdbahnebene liegt an der Himmelsphäre nur etwa 30 Grad vom galaktischen Äquator in dem am Nachthimmel schimmernden Band der Milchstraße entfernt, im Sternbild Drache. Der südliche Ekliptikpol liegt im Sternbild Schwertfisch. Der Nordpol der Galaxis befindet sich 30 Grad über der Ekliptik im Sternbild Haar der Berenike, und der galaktische Südpol im Sternbild Bildhauer. Das Zentrum der Galaxis liegt nahe der Erdbahnebene, perspektivisch im Sternbild Schütze. Von der hellen zentralen Verdickung, der Bulge, ist jedoch in dem für das menschliche Auge sichtbaren Lichtspektrum nicht viel zu sehen, da sie im Scheibenbereich auch von großen Mengen interstellaren Staubes umgeben ist.

Der Drehsinn des Milchstraßensystems um sein Zentrum stimmt nicht mit dem Umlaufsinn der Planeten um die Sonne überein. Die Rotation der galaktischen Scheibe erfolgt von Norden gesehen im Uhrzeigersinn, so, als würden die Spiralarme von der Rotation des Zentralbereiches nachgeschleppt; ihr Drehsinn ist gemessen am Sonnensystem gewissermaßen »gegenläufig«.

Der sonnennächste Stern ist Proxima Centauri. Sein Abstand zum Sonnensystem beträgt etwa 4,24 Lichtjahre beziehungsweise 268.000 AE.

Als Grund der Spiralstruktur in der Verteilung der Sterne vermuten viele Astronomen Dichtewellen noch unbekannter Ursache, an denen die Gas- und Staubmassen der galaktischen Scheibe während deren Rotation auflaufen und dadurch zu der Bildung neuer Sterne angeregt werden. Manche Astronomen machen für die anscheinend periodisch auftretenden Massensterben ein erheblich verstärktes Bombardement von Kometen verantwortlich, die bei den regelmäßigen Begegnungen des Sonnensystems mit diesen Dichtewellen in der Oort'schen Wolke aus der Bahn gebracht wurden.

Die galaktische Region, in der sich das Sonnensystem befindet, ist von interstellarem Staub weitgehend frei. Es ist die so genannte *lokale Blase*. Sie erstreckt sich ungefähr 200 Lichtjahre entlang der galaktischen Ebene und etwa 600 Lichtjahre senkrecht dazu. Diese große Blase besteht aus sehr heißem und extrem verdünntem Gas, hauptsächlich Wasserstoff, das diesen Staub von der Erde fern hält. Durch die extrem geringe Dichte von

ungefähr 5.000 Teilchen je Kubikmeter beziehungsweise 5 Teilchen je Liter ist seine Temperatur von etwa 4 Millionen Grad Celsius kein Problem für uns. Außerdem wird im Einflussbereich der Sonne der größte Teil dieses Gases durch den ihm entgegenstürmenden Sonnenwind mit abgeschirmt. Entdeckt wurde die Blase durch eine intensive Röntgenstrahlung, die aufgrund der hohen Temperatur von ihr ausgeht. Vor der Röntgenstrahlung schützt uns die Erdatmosphäre, daher konnte die heiße Blase erst von satellitengetragenen Röntgenteleskopen entdeckt werden. Die Entstehung der Blase wird den Druckwellen von etwa 10 Supernovae zugeschrieben, die demnach vor rund 4 Millionen Jahren in einer dichten Staubwolke explodiert sind. Solche Explosionen waren vermutlich auch an der Entstehung des Sonnensystems beteiligt, indem sie die Urwolke des späteren Sonnensystems durch ihre Druckwellen entscheidend vorkomprimierten.

Eine noch größere Blase wurde 500 Lichtjahre von uns entfernt in Richtung des Sternbildes Skorpion entdeckt und *Loop I* genannt. Sie hat einen Durchmesser von etwa 1.000 Lichtjahren. In ihrem Zentrum befindet sich die junge, so genannte Scorpio-Centaurus-Assoziation. Es wird vermutet, dass das Milchstraßensystem von Hunderten solcher heißer Blasen durchsetzt ist.

## Die Entstehung des Sonnensystems

Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren bewegte sich an Stelle unseres Sonnensystems eine ausgedehnte Materiewolke um das Zentrum der Galaxis. Die Wolke bestand zu über 99 % aus den Gasen Wasserstoff und Helium sowie einem geringen Anteil aus nur mikrometergroßen Staubeilchen, die sich aus schwereren Elementen und Verbindungen, wie Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, anderen Kohlenstoffverbindungen, Ammoniak und Siliziumverbindungen, zusammensetzten. Der Wasserstoff und der überwiegende Teil des Heliums waren bereits beim Urknall entstanden. Die schwereren Elemente und Verbindungen wurden im Innern von Sternen erzeugt und bei deren Explosion freigesetzt. Teile der Materiewolke zogen sich infolge der eigenen Schwerkraft zusammen und verdichteten sich. Den Anstoß hierzu könnte die Explosion einer relativ nahen Supernova gegeben haben, deren Druckwellen durch die Wolke wanderten. Diese Verdichtungen führten zu der Bildung von vermutlich mehreren hundert oder gar tausend Sternen in einem Sternhaufen, der sich wahrscheinlich nach einigen hundert Millionen Jahren in freie Einzel- oder Doppelsterne auflöste. Im Folgenden wird die Entwicklung desjenigen »Fragments« der Materiewolke betrachtet, aus dem sich unser Sonnensystem bildete.

Da bei der Kontraktion der Drehimpuls erhalten bleiben muss, hat sich eine schon minimal existierende Rotation der kollabierenden Wolke erhöht, ähnlich wie eine Eiskunstläuferin durch Anlegen der Arme eine schnelle Rotation erreicht. Die dabei entstehenden, nach außen wirkenden Fliehkräfte führten dazu, dass sich die Wolke in den Außenbereichen zu einer rotierenden Scheibe ausbildete.

Fast die gesamte Materie der Wolke stürzte jedoch in das Zentrum und bildete einen Protostern, der weiter kollabierte. Im Innern dieses Gaskörpers stiegen Druck und Temperatur so weit an, bis ein Kernfusionsprozess gezündet wurde, bei dem Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen. Die dabei freigesetzte Energie erzeugte einen Strahlungsdruck, welcher der Gravitation entgegenwirkte und die weitere Kontraktion aufhielt. Ein stabiler Stern – unsere Sonne – war entstanden.

In der verbleibenden protoplanetaren Scheibe führte nach dem bisherigen Modell die Verklumpung von Staubeilchen (Koagulation) zur Bildung von Planetesimalen, den Bausteinen der Planeten. Diese kilometergroßen Gebilde besaßen genug Masse, um sich durch ihre Gravitation mit anderen Planetesimalen zu größeren Objekten zu vereinigen. Nach neueren Modellen könnten auch gravitative Instabilitäten zu sich selbst verstärkenden Massekonzentrationen und damit zur Bildung von Planetesimalen führen. Dabei verlief das Wachstum nicht gleichmäßig. Die schwersten Objekte übten die größten Gravitationskräfte aus, zogen Materie aus einem weiten Umkreis an und konnten so noch schneller wachsen. Der »Protojupiter« störte schließlich mit seinem Gravitationsfeld andere Planetesimale und beeinflusste deren Wachstum. Offensichtlich verhinderte er auch die Bildung eines größeren Körpers zwischen der Mars- und Jupiterbahn, was zur Entstehung des Asteroidengürtels führte.

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Prozesse der Planetenentstehung hatte der Abstand der Protoplaneten zur jungen Sonne. In Sonnennähe kondensierten schwerflüchtige Elemente und Verbindungen aus, während leichtflüchtige Gase durch den kräftigen → Sonnenwind weggerissen wurden. Hier entstanden die inneren Planeten, Merkur, Venus, Erde und Mars mit festen silikatischen Oberflächen. In den kälteren Außenregionen konnten die entstehenden Planeten auch die leichtflüchtigen Gase, wie Wasserstoff, Helium und Methan festhalten. Hier bildeten sich die »Gasriesen« Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

Ein Teil der Materie, der nicht von den Planeten eingefangen wurde, verband sich zu kleineren Objekten, den Kometen und Asteroiden. Da diese Himmelskörper seit der Frühzeit des Sonnensystems nahezu unver-

ändert blieben, kann deren Erforschung wichtige Hinweise zu dessen Entstehungsgeschichte liefern. Ebenfalls sehr wertvolle Erkenntnisse brachte die Untersuchung von → Meteoriten. Dies sind Bruchstücke von Planetoiden, die ins Schwerefeld der Erde gerieten.

Auch wenn die Grundprinzipien der Planetenentstehung bereits als weitgehend verstanden gelten, gibt es doch noch zahlreiche offene und nicht unwesentliche Fragen. Eines der Probleme ist die paradox erscheinende Verteilung des Drehimpulses auf die Sonne und die Planeten, denn der Zentralkörper enthält fast 99,9 % der Masse des gesamten Systems, besitzt aber nur etwa 0,5 % des Drehimpulses; der Hauptanteil daran steckt im Bahndrehimpuls ihrer Begleiter. So ist auch die Neigung der Äquatorebene der Sonne gegenüber der mittleren Bahnebene der Planeten von etwa 7° ein Rätsel. Aufgrund ihrer überaus dominierenden Masse dürfte die Sonne (anders als zum Beispiel die Erde) durch die Wechselwirkung mit ihnen kaum ins Taumeln geraten. Möglicherweise hatte sie in ihrer Frühzeit einen Zwergstern als Begleiter oder erhielt »Besuch« von einem Nachbarstern des ursprünglichen Sternhaufens, der durch seine Anziehung die *protoplanetare Scheibe* um etwa 7° kippte, während die Sonne aufgrund ihrer geringen räumlichen Ausdehnung weitgehend unbeeinflusst blieb.

### Merksatz zur Reihenfolge der neun Planeten

Von der Sonne aus gesehen:

»Mein Vater erklärt mir jeden Samstag unsere neun Planeten.«  
(Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Pluto)

Oder auch:

»Mein Vater erklärt mir an jedem Samstag unsere neun Planeten.«  
(unter Berücksichtigung des Asteroidengürtels)

Und selten auch:

»Mein Vater erklärt mir jeden Samstag unsere Planeten neu.«  
(Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Pluto, Neptun; aufgrund der elliptischen Umlaufbahn des Pluto ist seine Distanz zur Sonne zu bestimmten Zeiten kleiner als die des Neptun)

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnensystem>. Historie: 22.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Alkuin, Arnomane, Ben-Zin, Lotse, SiriusB, Kurt Jansson, Spawn Avatar, Sig11, Phrood, Nephelin, Sikilai, Zwobot, Malteser, Stefan h, Schewek, Koethnig, Mr. B.B.C., Onel, AkaBot, Mariachi, Dominik, Kai11, Saperaud, Stern, Tkarcher, Hagbard, Rainer Bielefeld, .x, CSonic, Klausbg, Vesta, Spektrum, Reeno, Odin, Jörg Knappen, Heinz Wittenbrink, Kerish, Fristu, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

## Sonne

Die Sonne (lat. *Sol*) ist der lokale Stern im Zentrum unseres Sonnensystems (auch als *Zentralgestirn* bezeichnet). Populär wird dieser Begriff auch synonym zu Stern verwendet. Das Zeichen der Sonne: ☉

Die Sonne ist für das Leben auf der Erde von fundamentaler Bedeutung. Viele wichtige Prozesse auf der Erdoberfläche, wie das Klima und das Leben selbst, werden durch die Strahlungsenergie der Sonne angetrieben. So stammen etwa 99,998 % des gesamten Energiebeitrags zum Erdklima von der Sonne – der winzige Rest wird aus geothermischen Wärmequellen gespeist. Auch die Gezeiten gehen zu einem Drittel auf die Schwerkraft der Sonne zurück.

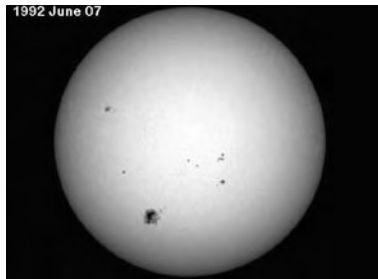


Abb. 1: Die Sonne am 7. Juni 1992. Der Sonnenfleck links unten hat etwa 5fache Erdgröße.

### Allgemeines

Die Sonne ist der beherrschende Himmelskörper in unserem Planetensystem, dessen Masse sie zu 99,9 % ausmacht. Ihr Durchmesser beträgt 1,3925 Millionen km (109facher Erddurchmesser), was knapp unter dem Mittelwert aller Sterne liegt. Sie ist ein Stern der so genannten Hauptreihe, ihre Spektralklasse ist G2 und sie hat die Leuchtkraftklasse V. Das bedeutet, dass die Sonne ein durchschnittlicher, gelb leuchtender »Zwergstern« ist, der sich in der etwa 10 Milliarden Jahre dauernden Hauptphase seiner Entwicklung befindet. Ihr Alter wird auf etwa 4,6 Milliarden Jahre geschätzt.

Die Leuchtkraft der Sonne entspricht einer Strahlungsleistung von etwa 3,8·10<sup>26</sup> Watt. Diese Strahlung wird zum Großteil im Bereich des sichtbaren Lichts abgegeben mit einem Maximum in den Spektralfarben Gelb und Grün. Die Farbe der Sonne, die wir als gelb wahrnehmen, erklärt sich aus ihrer Oberflächentemperatur von etwa 5.700 °C. Die zentrale Bedeutung der Sonne für die Lebensprozesse auf der Erde zeigt sich auch hier: Jener Bereich des elektromagnetischen Spektrums, in dem die Sonne am stärksten strahlt, ist genau der für uns Menschen und die meisten anderen Lebewesen sichtbare Teil dieses Spektrums.

Die Sonnenmasse beträgt etwa das Doppelte der geschätzten Durchschnittsmasse aller Sterne unserer Milchstraße. Zählt man nur die Sterne

mit Kernfusion (schließt also die »Braunen Zwerge« aus), liegt die Masse im Durchschnitt. Sie setzt sich zu 73,5 % aus Wasserstoff und zu 25 % aus Helium zusammen. Hinsichtlich der Anzahl der Atome betragen diese Anteile 92,7 % und 7,9 %. Die restlichen 1½ Prozent der Sonnemasse setzen sich aus zahlreichen schwereren Elementen zusammen, vor allem Sauerstoff und Kohlenstoff. Im Sonnenkern entsteht aus den dicht gedrängten Atomkernen des Wasserstoffs durch Kernfusion Helium, so dass der Wasserstoff-Anteil zugunsten des Heliums in Zukunft weiter sinken wird. Dieser Prozess ist der Motor der Sonne, aus dem sie jene Energie bezieht, die sie an der Photosphäre (leuchtende, sichtbare Oberfläche) durch Strahlung abgibt. Da die Sonne kein fester Körper wie die erdähnlichen Planeten und Monde ist, sondern ein heißer Gasball, wäre sie ohne diesen Energienachschub von innen *instabil*. Sie würde sich abkühlen und auf einen Bruchteil ihrer jetzigen Größe zusammenziehen.

Die Sonne rotiert in rund vier Wochen um die eigene Achse. Diese Rotation dauert am Äquator 25,4 Tage, in mittleren Breiten 27–28 Tage und nahe den Polen 36 Tage. Dieser Unterschied in der Dauer eines *Sonnentages* wird als differenzielle Rotation bezeichnet und ist seit längerem durch Gas- und Hydrodynamik erklärbar.

### Kulturgeschichte

Die Sonne ist das zentrale Gestirn am Himmel, von ihr hängt alles Leben auf der Erde ab. Diese überragende Bedeutung war den Menschen von alters her bewusst. Viele frühere Kulturen verehrten sie als Gottheit. Die regelmäßige tägliche und jährliche Wiederkehr der Sonne wurde teils ängstlich erwartet und mittels kultischer oder magischer



Abb. 2: Der Sonnenwagen von Trundholm

Rituale beschworen. Besonders das Auftreten einer Sonnenfinsternis löste große Bestürzung und Furcht aus. Im alten China glaubte man, ein Drache würde die Sonne verschlingen. Durch die Erzeugung von großem Lärm versuchte man, das Untier dazu zu bewegen, die Sonne wieder freizugeben. Andererseits machte sich die Menschheit das Wissen über die für alles Leben fundamentalen Perioden Tag und Jahr schon seit frühester Zeit nutzbar. Die Sonne ist die natürliche Uhr der Menschen, und die Abfolge der Jahreszeiten führte zur Entwicklung des Kalenders, der vor allem nach Erfindung des Ackerbaus für alle Kulturen überlebenswichtig war.



Für die Sumerer verkörperte die Sonne den Sonnengott Utu. Bei den Babyloniern entsprach er dem Gott Schamasch, der jeden Tag den Himmel betrat und dessen Strahlen nichts verborgen blieb. Im alten Ägypten wurde Ra (auch Re oder Atum) als Sonnengott verehrt. Der »Ketzer«-Pharao Echnaton ließ später nur noch Aton, die personifizierte Sonnenscheibe, als einzigen Gott zu und schaffte alle anderen ägyptischen Götter ab.

Im antiken Griechenland verehrte man den Sonnengott Helios, der mit seinem Sonnenwagen täglich über das Firmament fuhr. Allerdings sind aus dem antiken Griechenland auch die ersten Überlegungen überliefert, in denen die Sonne als physikalisches Objekt betrachtet wird. Die wohl älteste dieser Hypothesen stammt dabei von Xenophanes, der die Sonne als eine feurige Ausdünstung oder Wolke benannte. So naiv diese Beschreibung aus heutiger Sicht zwar wirkt, stellt sie doch einen gewaltigen kulturhistorischen Schritt dar, denn die Wahrnehmung der Sonne als ein natürliches Objekt widerspricht fundamental der vorherigen – und auch der oft noch in späteren Jahrhunderten vertretenen – Auffassung der Sonne als Teil einer göttlichen Entität. Es ist daher auch wenig verwunderlich, dass aus eben diesen Gedanken auch die erste kritische Auseinandersetzung mit dem vermenschlichten Götterbild des antiken Griechenlands hervorgingen (*»Wenn die Pferde Götter hätten, sähen sie wie Pferde aus.«*) und daraus folgend erste Gedanken zum Monotheismus. Interessant ist dabei sicherlich auch der Vergleich mit dem bereits oben erwähnten ägyptischen Monotheismus des Echnaton, der ja gerade die Vergötterung der Sonne als Ausgangspunkt nahm. Man kann also sagen, dass mit Xenophanes die Sonne zum ersten Mal in der europäischen Geschichte als Gegenstand der Physik auftauchte oder – etwas schmissiger – dass es sich um die Geburtsstunde der Astrophysik handelte. Die Thesen des Xenophanes wurden später auch von anderen griechischen Philosophen aufgenommen, zum Beispiel beschrieb der Vorsokratiker Anaxagoras die Sonne als glühenden Stein. Diese Auffassungen setzte sich allerdings im Folgenden nicht bei allen Denkern durch, und viele spätere Schulen fielen wieder auf eher mythische Erklärungen zurück. Der Volksglaube in Griechenland nahm wahrscheinlich keinerlei Kenntnis von all diesen Überlegungen.

Dem griechischen Gott Helios entsprach weitgehend der unbesiegbare römische Gott Sol invictus, dessen Kult in der Kaiserzeit weit verbreitet war. Aus der Antike übernommen ist die Sonne als Symbol der Vitalität in der Astrologie.

In der nordischen Mythologie formten die Götter die Sonne aus einem Funken und legten sie in einen Wagen. Die Göttin Sol fährt mit dem Wa-

gen über den Himmel, gezogen von den Rössern Alsvidr und Arwagr. Das Gespann wird beständig von dem Wolf Skalli (Skoll) verfolgt. Am Tag des Weltunterganges (Ragnarök) wird der Wolf die Sonne verschlingen.

Im frühen Mexiko wurde der Sonnengott Tonatiuh von den Azteken verehrt. Bei den Maya und den Inka waren Itzamná beziehungsweise Inti die Hauptgottheiten.

Die Beobachtung der Sonne (und anderer Sterne) und die Bestimmung ihrer Bahnpunkte (Tag- und Nachtgleiche, Sommer- und Winter Sonnenwende) war eine Voraussetzung für die Erstellung von Kalendern. Hierdurch konnten wichtige jahreszeitliche Ereignisse vorherbestimmt werden, wie das Eintreffen des Nilhochwassers im alten Ägypten, der günstigste Zeitpunkt der Saat oder das Eintreffen der für die Seefahrt gefährlichen Herbststürme. Vorchristliche Kultstätten, wie Stonehenge, waren offensichtlich zu derartigen Beobachtungszwecken errichtet worden. Die Anlage von Stonehenge ist so ausgerichtet, dass am Morgen des Mittsommertages, wenn die Sonne ihre höchste nördliche Position erreicht, die Sonne direkt über einem Positionsstein (»Fersenstein«) aufgeht und die Sonnenstrahlen in gerader Linie ins Innere des Bauwerks eindringen.

Die bronzezeitliche Himmelscheibe von Nebra scheint ebenfalls ein Instrument zur Himmelsbeobachtung gewesen zu sein. Ihre goldenen Ränder werden u. a. als »Sonnenbarken«, ein religiöses Symbol der Bronzezeit, interpretiert. In die gleiche Zeit fällt auch der Sonnenwagen von Trundholm, bei der die Scheibe als Sonnensymbol mit einer Tag- und Nachtseite gedeutet wird.

Das antike Weltbild ging allgemein davon aus, dass die Erde den Mittelpunkt des Universums bildete. Sonne, Mond und die Planeten bewegten sich auf exakten Kreisbahnen um die Erde. Diese Vorstellung, zusammengefasst von Ptolemäus, hielt sich fast 2.000 Jahre lang. Insbesondere die Kirche verteidigte dieses Weltbild, zumal auch in der Bibel dargelegt wird, dass sich die Sonne bewegt. Allerdings zeigte das Modell Schwächen. So konnte die Bewegung der Planeten nur durch komplizierte Hilfskonstruktionen erklärt werden. Bereits Aristarch von Samos postulierte im 2. Jahrhundert v. Chr., dass die Sonne das Zentrum der Welt darstelle. Die Gelehrten Nikolaus von Kues und Regiomontanus griffen diesen Gedanken mehr als 1.500 Jahre später wieder auf. Nikolaus Kopernikus versuchte in seinem Werk *De Revolutionibus Orbium Coelestium* eine mathematische Grundlage dafür zu schaffen, was ihm letztendlich nicht gelang. Sein Werk regte allerdings weitere Forschungen an und bereitete das Fundament für das »Kopernikanische Weltbild«. Kopernikus' Werk wurde von der Kirche

zunächst nicht als Ketzerei betrachtet, da es ein rein mathematisches Modell darstellte. In späteren Jahren, als Gelehrte daran gingen, Kopernikus' Vorstellung in ein reales Weltbild umzusetzen, wandte sich die Kirche jedoch entschieden gegen solche »umstürzlerischen« Gedanken. Gelehrte wie Galilei, die ebenfalls zur Erkenntnis einer zentralen Sonne gelangt waren, wurden von der Inquisition verfolgt. Durch weitere Beobachtungen, exakte Bestimmungen der Planetenbahnen, die Einführung des Teleskops und die Entdeckung der Gesetze der Himmelsmechanik setzte sich das heliozentrische Weltbild allmählich durch.

Die weiteren Fortschritte der Astronomie ergaben schließlich, dass auch die Sonne keine herausragende Stellung im Universum einnimmt, sondern ein Stern unter Abermilliarden Sternen ist.

## Aufbau

Die Sonne besteht aus verschiedenen Zonen mit schalenförmigem Aufbau, wobei die Übergänge allerdings nicht streng voneinander abgegrenzt sind.

**Kern** – Sämtliche freiwerdende Energie stammt aus einer als »Kern« bezeichneten Zone im Innern der Sonne. Dieser Kern erstreckt sich vom Zentrum bis zu etwa einem Viertel des Radius der sichtbaren Sonnenoberfläche. Obwohl der Kern nur 1,6 % des Sonnenvolumens ausmacht, sind hier rund 50 % der Sonnenmasse konzentriert. Bei einer Temperatur von etwa 15,6 Millionen K liegt die Materie in Form eines Plasmas vor. Durch die Proton-Proton-Reaktion verschmelzen Wasserstoffkerne zu Heliumkernen, wobei Gammastrahlung und Elektronenneutrinos erzeugt werden. Die erzeugten Heliumkerne haben aufgrund der Bindungsenergie eine geringfügig geringere Masse als die Summe der ursprünglichen Wasserstoffkerne (Massendefekt). Der Massenunterschied wird gemäß der Formel  $E = m \cdot c^2$  in Energie umgewandelt (pro Proton-Proton-Fusion  $\approx 27$  MeV). Im Kern der Sonne werden pro Sekunde 700 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 695 Millionen Tonnen Helium fusioniert, wobei eine Gesamtleistung von etwa  $4 \cdot 10^{26}$  W = 400 Quadrillionen Watt freigesetzt wird.

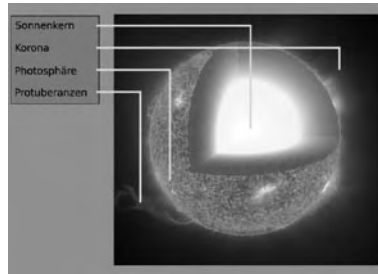


Abb. 3: Aufbau der Sonne

Eigentlich ist der Sonnenkern zu »kalt« für eine Kernfusion. Die kinetische Energie der Teilchen reicht rechnerisch nicht aus, um bei einem Zusammenstoß die starken Abstoßungskräfte der positiv geladenen Protonen (Wasserstoffkerne) zu überwinden. Dass dennoch Fusionen stattfinden, ist auf den quantenmechanischen Tunneleffekt zurückzuführen. Gemäß der Quantenmechanik verhält sich ein Proton wie eine ausgebreitete Welle ohne genau definierten Ort, seine Energie schwankt um einen Mittelwert. Es besteht dabei eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Protonen so weit nähern, dass eine Verschmelzung stattfinden kann. Das Energieniveau der abstoßenden Kräfte wird bei der Verschmelzung gleichsam »durchtunnelt«. Somit ist die Wahrscheinlichkeit einer Fusion zweier Wasserstoffkerne im Innern der Sonne sehr gering. Da jedoch eine immense Anzahl von Kernen vorhanden ist, können dennoch gewaltige Energiemengen freigesetzt werden. Die »gebremste« Kernfusion hat für das Sonnensystem und das Leben auf der Erde den entscheidenden Vorteil, dass die Sonne sparsam mit ihren Energievorräten umgeht und über einen langen Zeitraum konstante Energiemengen abstrahlt.

**Strahlungszone** – Um den Kern herum liegt die so genannte »Strahlungszone«, die etwa 70 % des Sonnenradius ausmacht. Im Vakuum des Weltalls bewegen sich Gammaphotonen mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Im Innern der Sonne herrscht eine derart hohe Dichte, dass die Photonen immer wieder mit den Teilchen des Plasmas zusammenstoßen, dabei absorbiert und wieder abgestrahlt werden. Sie bewegen sich auf einer völlig zufälligen Bahn und diffundieren dabei Richtung Sonnenoberfläche. Statistisch benötigt ein Photon etwa 170.000 Jahre, um die Strahlungszone zu passieren. Dies bedeutet, dass das Licht, welches wir heute von der Sonne erhalten, bereits vor entsprechend langer Zeit erzeugt wurde. Bei jedem Zusammenstoß in der Strahlungszone nimmt die Strahlungsenergie des Photons ab und seine Wellenlänge zu. Die Gammastrahlung wird in Röntgenstrahlung umgewandelt. Anders als die Photonen gelangen die Neutrinos nahezu ungehindert durch die Schichten der Sonne, da sie kaum mit Materie in Wechselwirkung treten. Die Neutrinos erreichen, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, bereits nach acht Minuten die Erde, wobei sie den Planeten fast ungehindert durchqueren. In jeder Sekunde durchqueren etwa 70 Milliarden Neutrinos einen Quadratzentimeter der Erdoberfläche.

**Konvektionszone** – An die Strahlungszone schließt sich die »Konvektionszone« an. Am Grenzbereich zur Strahlungszone beträgt die Temperatur noch etwa zwei Millionen Kelvin. Die Energie wird in dieser Zone nicht mehr durch Strahlung abgegeben, sondern durch eine Strömung (Konvektion) der Plasmas weiter nach außen transportiert. Dabei steigt heiße Materie in gewaltigen Strömen nach außen, kühlt dort ab und sinkt wieder ins Sonneninnere hinab. Da das frisch aufgestiegene Plasma heißer und damit heller ist als das absteigende, sind die Konvektionszellen mit einem Teleskop als Granulation der Sonnenoberfläche erkennbar.

**Sonnenoberfläche und Umgebung** – Oberhalb der Konvektionszone liegt die Photosphäre, die wir als Quelle der Sonnenstrahlung wahrnehmen: eine »Kugelschale aus Licht« als die für uns sichtbare Sonnenoberfläche. Sie ist aber nur eine 300–400 km dicke Schicht, deren Temperatur an der Oberfläche rund 6.000 Kelvin (5.700 °C) beträgt. Die Photosphäre gilt allgemein als die eigentliche Sonnenoberfläche, obwohl unser Zentralgestirn – wie auch die meisten anderen Sterne – keine scharfe äußere Grenze besitzt.

Die Photosphäre gibt die gesamte vom Sonneninnern erzeugte und aufsteigende Energie als Strahlung ab – großteils im sichtbaren Licht, was auch ihr Name andeutet (griech. *φως* = *Licht*). Erst hier hat die Energie der Strahlungsquanten so weit abgenommen, dass sie unschädlich und für das menschliche Auge sichtbar sind. Wegen ungeheurer Wirbel und variabler Magnetfelder (Quelle der Sonnenflecken) darf man sich die Oberfläche allerdings nicht als glatt vorstellen. Durch digitale Bildverarbeitung der Messungen von SOHO, TRACE oder CHANDRA kann man sie so darstellen, dass sie wie hartes, aber dauernd bewegliches Material aussieht. Für die Turbulenzen ist auch die elektrische Leitfähigkeit der heißen Sonnenmaterie entscheidend.

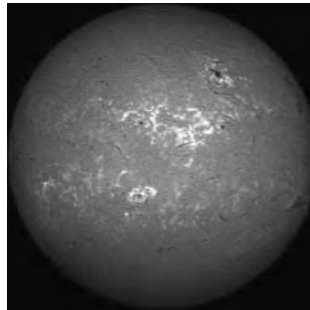


Abb. 4: Die Chromosphäre der Sonne im Licht der H- $\alpha$ -Linie

Über der Photosphäre erstreckt sich die Chromosphäre. Sie wird von jener zwar überstrahlt, ist aber bei Sonnenfinsternissen für einige Sekunden als rötliche Leuchterscheinung zu sehen. Die Temperatur nimmt hier auf über 10.000 K zu, während die Gasdichte um den Faktor  $10^{-4}$  auf  $10^{-15}$  g/cm<sup>3</sup> abnimmt.

Über der Chromosphäre liegt die Korona, in der die Dichte nochmals um den Faktor  $10^{-4}$  auf  $10^{-19}$  g/cm<sup>3</sup> abnimmt. Die innere Korona erstreckt sich – je nach dem aktuellen Fleckenzyklus – um 1–2 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 Korona-Materie allerdings auf Temperaturen bis zu zwei Millionen Kelvin aufgeheizt. Die genauen Ursachen dieser Heizmechanismen sind freilich noch unklar. Eine mögliche Energiequelle wären akustische Wellen und Microflares – kleine Ausbrüche auf der Sonnenoberfläche.

Ein besonders hoher Temperaturgradient herrscht an der Untergrenze der Korona, wo ihre Dichte nach oben schneller abnimmt, als die Energie abtransportiert werden kann. Innerhalb einiger 100 Höhenkilometer steigt die kinetische Gastemperatur um eine Million Grad und »macht sich Luft«, indem die zusätzliche Heizenergie als »Sonnenwind« entweicht. Die Korona kann nur aufgrund ihrer extrem geringen Dichte so heiß werden.

Der bei jeder totalen Sonnenfinsternis sichtbare Strahlenkranz (lat. *Corona* = Krone) hat schon vor Jahrtausenden die Menschen erstaunt. Er kann bis mehrere Millionen Kilometer reichen und zeigt eine strahlenförmige Struktur, die sich mit dem Zyklus der Sonnenflecken stark ändert. Im Sonnenflecken-Maximum verlaufen die Strahlen nach allen Seiten, im Minimum nur in der Nähe des Sonnenäquators.

Die Korona erstreckt sich bis zur Heliopause, wo sie auf das interstellare Medium trifft.



Abb. 5: Die Korona der Sonne während der Sonnenfinsternis im Jahre 1999

### Magnetfeld

Die Sonne besitzt außerordentlich starke Magnetfelder, die durch die Strömung der elektrisch leitenden Gase hervorgerufen werden. Die Leitfähigkeit des Plasmas im Sonneninnern entspricht dem von Kupfer bei Zimmertemperatur. In der Sonne zirkulieren elektrische Ströme in einer Größenordnung von  $10^{12}$  Ampere. Das Innere der Sonne wirkt somit wie ein gigantischer Dynamo, der die Bewegungsenergie eines elektrischen Leiters in elektrische Energie und ein Magnetfeld umwandelt. Man geht



derzeit davon aus, dass dieser Dynamo-effekt nur in einer dünnen Schicht am Boden der Konvektionszone wirksam ist.

Sichtbare Auswirkungen der Magnetfelder sind die Sonnenflecken und die Protuberanzen. Sonnenflecken sind relativ kühle Bereiche der Sonnenatmosphäre. Ihre Temperatur liegt zwischen 3.700 und 4.500 K. Durch spektrosko-

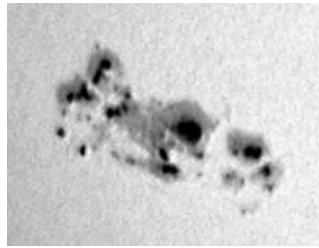


Abb. 6: Große Sonnenfleckengruppe im Jahr 2004



Abb. 7: Protuberanz

bei Anwesenheit eines Magnetfeldes dreigeteilt (Zeeman-Effekt), wobei der Abstand der Linien proportional zur Stärke des Feldes ist. Die Magnetfeldstärke im Umfeld der Sonnenflecken kann bis zu 0,3 Tesla (3.000 Gauß) betragen und ist somit tausendmal stärker als das irdische Magnetfeld an der Erdoberfläche. In der Sonne bewirken die Magnetfelder eine Hemmung der Konvektionsströmungen, so dass weniger Energie nach außen transportiert wird.

Die dunkelsten und kühlgsten Zonen auf der Sonne sind somit die Orte mit den stärksten Magnetfeldern.

Sonnenflecken treten in Gruppen auf, wobei meistens zwei auffällige Flecken dominieren, die eine entgegengesetzte magnetische Ausrichtung aufweisen (ein Fleck ist sozusagen ein »magnetischer Nordpol«, der andere ein »Südpol«). Solche bipolaren Flecken sind meist in Ost-West-Richtung, parallel zum Sonnenäquator, ausgerichtet.

Zwischen den Flecken bilden sich Magnetfeldlinien in Form von Schleifen aus. Längs dieser Linien wird ionisiertes Gas festgehalten, das in Form von Protuberanzen oder Filamenten sichtbar wird (Protuberanzen sind Erscheinungen am Rand, Filamente auf der »Sonnenscheibe«).

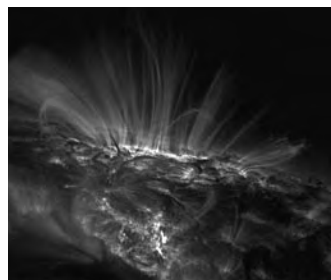


Abb. 8: Schleifenförmige Gasfilamente auf der Sonne im UV-Licht

Die Gesamtzahl der Sonnenflecken unterliegt einem Zyklus von rund elf Jahren. Während eines Fleckenminimums sind kaum Sonnenflecken sichtbar. Mit der Zeit bilden sich zunehmend Flecken in einem Bereich von 30° nördlicher und südlicher Breite aus. Diese aktiven Fleckengürtel bewegen sich zunehmend in Richtung Äquator. Nach etwa 5,5 Jahren ist das Maximum erreicht und die Zahl der Flecken nimmt langsam wieder ab. Nach einem Zyklus hat sich das globale Magnetfeld der Sonne umgepol. Der vorher magnetische Nordpol ist jetzt der magnetische Südpol.

Die genauen Ursachen für den elfjährigen Zyklus sind noch nicht vollständig erforscht. Derzeit geht man von folgendem Modell aus: Zu Beginn eines Zyklus, im Minimum, ist das globale Magnetfeld der Sonne bipolar ausgerichtet. Die Magnetfeldlinien verlaufen geradlinig über den Äquator von Pol zu Pol. Durch die differenzielle Rotation werden die elektrisch geladenen Gasschichten gegeneinander verschoben, wobei die Magnetfelder zunehmend gestaucht, verdreht und verdreht werden. Die Magnetfeldlinien ragen zunehmend aus der sichtbaren Oberfläche heraus und verursachen die Bildung von Flecken und Protuberanzen. Nach dem Fleckenmaximum richtet sich das Magnetfeld wieder neu aus.

## Pulsation

Die gesamte Sonne pulsiert in unterschiedlichen Frequenzen. Sie schwingt gleichsam wie eine riesige Glocke. Allerdings können wir die Schallwellen auf der Erde nicht »hören«, da das Vakuum des Weltraums diese nicht weiterleitet. Mit speziellen Methoden kann man die Schwingungen jedoch sichtbar machen.

Schwingungen aus dem Sonneninnern bewegen die Photosphäre auf und ab. Aufgrund des Dopplereffekts werden die Absorptionslinien des Sonnenspektrums, je nach Bewegungsrichtung der Gase, verschoben. Die hauptsächlich vorherrschende Schwingung hat eine Periodendauer von etwa fünf Minuten ( $293 \pm 3$  Sekunden).

Innerhalb der Konvektionszone herrschen heftige Turbulenzen, wobei aufsteigende Konvektionszellen bei der Strömung durch die umliegenden

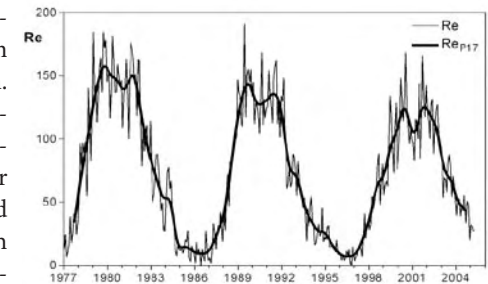


Abb. 9: Sonnenfleckenzahl in den Jahren 1977 bis 2004

Gase Schallwellen erzeugen. Nach außen laufende Schallwellen erreichen die Grenzschicht zur Photosphäre. Da dort die Dichte stark abnimmt, können die Wellen sich dort nicht ausbreiten, sondern werden reflektiert und laufen wieder ins Sonneninnere. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Dichte der Materie und die Schallgeschwindigkeit zu, so dass die Wellenfront gekrümmt und wieder nach außen geleitet wird. Durch wiederholte Reflexion und Überlagerung können Schallwellen verstärkt werden, es bilden sich Resonanzen aus. Die Konvektionszone wirkt somit wie ein riesiger Resonanzkörper, der die darüber liegende Photosphäre in Schwingung versetzt.

Die Auswertung der Schwingungen erlaubt eine Aussage über den inneren Aufbau der Sonne. So konnte die Ausdehnung der Konvektionszone bestimmt werden. Analog zur Erforschung von seismischen Wellen auf der Erde spricht man bei dem solaren Wissenschaftszweig von der Heli-seismologie.

### Wechselwirkung der Sonne mit ihrer Umgebung

Die Sonne beeinflusst auch den interplanetaren Raum mit ihrem Magnetfeld und vor allem mit der Teilchenemission, dem  $\rightarrow$ Sonnenwind. Dieser Teilchenstrom kann die Sonne mit mehreren 100 km/s verlassen und verdrängt das Interstellare Medium bis zu einer Entfernung von mehr als zehn Milliarden Kilometern. Bei Sonneneruptionen können sowohl Geschwindigkeit als auch Dichte des Sonnenwindes stark zunehmen und auf der Erde neben Polarlichtern auch Störungen in elektronischen Systemen und im Funkverkehr verursachen.

### Erforschung der Sonne

**Frühe Beobachtungen** – Als der wichtigste Himmelskörper für irdisches Leben genoss die Sonne bereits vor der Geschichtsschreibung Aufmerksamkeit. Kultstätten wie Stonehenge wurden errichtet, um die Position und den Lauf der Sonne zu bestimmen, insbesondere die Zeitpunkte der Sonnenwenden. Es wird vermutet, dass einige noch ältere Stätten ebenfalls zur Sonnenbeobachtung benutzt wurden, gesichert ist dies aber nicht. Der Verlauf der Sonne sowie besonders Sonnenfinsternisse wurden von den unterschiedlichen Kulturen sehr aufmerksam beobachtet und dokumentiert. Aufzeichnungen aus dem alten China belegen die Beobachtungen besonders heftiger Sonnenfleckentätigkeit. Sonnenflecken können mit bloßem Auge wahrgenommen werden, wenn die Sonne tief am Horizont steht und das Sonnenlicht durch die dichte Erdatmosphäre »gefiltert« wird.

### Beobachtungen mit Teleskopen –

Auch in Europa hatte man zu der damaligen Zeit Sonnenflecken wahrgenommen, wobei man sie allerdings für »atmosphärische Ausdünstungen« hielt. Erst die Entwicklung des Teleskops führte zu einer systematischen Erforschung des Phänomens. Im Jahre 1610 beobachteten Galileo Galilei und Thomas Harriot die Flecken erstmals mittels Teleskop. Johann Fabricius beschrieb sie 1611 als Erster in einer wissenschaftlichen Abhandlung. Die beobachtete Wanderung der Flecken auf der Sonnenscheibe führte er zutreffend auf die Eigenrotation der Sonne zurück. 1619 postulierte Johannes Kepler einen Sonnenwind, da der Schweif von  $\rightarrow$ Kometen immer von der Sonne weggerichtet ist.

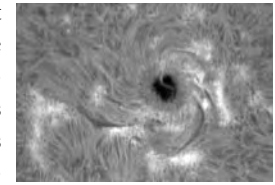


Abb. 10: Einzelner Sonnenfleck

1775 vermutete Christian Horrobow bereits, dass die Sonnenflecken einer gewissen Periodizität unterliegen. 1802 wies William Hyde Wollaston erstmals dunkle Linien (Absorptionslinien) im Sonnenspektrum nach. Joseph von Fraunhofer untersuchte die Linien ab 1814 systematisch, sie werden daher auch als »Fraunhoferlinien« bezeichnet (vgl. Farbtafeln Abb. 136). 1843 publizierte Samuel Heinrich Schwabe seine Entdeckung des Zyklus der Sonnenfleckenaktivität. 1849 wurde die Sonnenfleckenrelativzahl eingeführt, die die Anzahl und Größe der Sonnenflecken wiedergibt. Seither werden die Flecken regelmäßig beobachtet und gezählt. 1889 entwickelte George Ellery Hale den Spektroheliographen. Henry Augustus Rowland vollendete 1897 einen Atlas des Sonnenspektrums, der sämtliche Spektrallinien enthält. 1908 entdeckte George Ellery Hale die Aufspaltung von Spektrallinien im Bereich der Sonnenflecken durch magnetische Kräfte (Zeeman-Effekt). 1930 beobachtete Bernard Ferdinand Lyot die Sonnenkorona außerhalb einer totalen Finsternis.

Lange Zeit unklar war allerdings, woher die Sonne ihre Energie bezieht. So hatte man die Vorstellung, dass die Sonne ein glühender, brennender Körper sei. Allerdings hätte der Brennstoff nur für einige tausend Jahre gereicht. William Thomson, der spätere Lord Kelvin, ging davon aus, dass die Sonne durch die eigene Schwerkraftwirkung schrumpfe und die Bewegungsenergie der Sontenteilchen in Wärme umgewandelt würde. So könnte die Sonne für etwa hundert Millionen Jahre Energie abgeben. Mit der Entdeckung der irdischen Radioaktivität stellte man allerdings fest, dass die Gesteine der Erdkruste mehrere Milliarden Jahre alt sein müssen. Erst die Entschlüsselung der atomaren Vorgänge brachte eine Lösung. Er-

nest Rutherford beschrieb einen Zusammenhang zwischen Radioaktivität und Kernumwandlung. Arthur Stanley Eddington folgerte, dass im Inneren der Sterne Elemente verschmelzen und in andere umgewandelt werden, wobei Energie freigesetzt wird. Da bei spektroskopischen Untersuchung hauptsächlich Wasserstoff festgestellt wurde, ging man davon aus, dass dieses Element eine entscheidende Rolle spiele. 1938 beschrieb Hans Bethe schließlich die Prozesse Proton-Proton-Reaktion, die im Inneren der Sonne ablaufen.

1942 wurde festgestellt, dass die Sonne Radiowellen ausstrahlt. 1949 wies Herbert Friedman die solare Röntgenstrahlung nach.

Im Laufe der Zeit wurden spezielle Sonnenobservatorien errichtet, die ausschließlich der Beobachtung der Sonne dienen.

1960 wurde die Schwingung der Photosphäre nachgewiesen. Dies war der Beginn der Helioseismologie, die die Eigenschwingungen der Sonne untersucht und daraus den inneren Aufbau sowie Prozesse ableitet.

Zur Messung der Sonnen-Neutrinos wurden riesige unterirdische Detektoren errichtet. Die Diskrepanz zwischen dem theoretischen und tatsächlich gemessenen Neutrinofluss führte seit den 1970ern zum so genannten *solaren Neutrino*problem: Es konnte nur etwa  $\frac{1}{3}$  der erwarteten Neutrinos detektiert werden. Dies ließ zwei Möglichkeiten zu. Entweder war das Sonnenmodell falsch und der erwartete solare Neutrinofluss wurde überschätzt, oder die Neutrinos können sich auf dem Weg zur Erde in eine andere »Art« umwandeln (Neutrinooszillation). Erste Hinweise für diese Neutrinooszillation wurden im Jahr 1998 am Super-Kamiokande gefunden und inzwischen allgemein bestätigt.

### Erforschung durch Satelliten und Raumsonden –

Eine Reihe von Satelliten wurde für die Beobachtung der Sonne in eine Erdumlaufbahn geschickt. Mittels der Satelliten können insbesondere Wellenlängenbereiche untersucht werden (Ultraviolett, Röntgenstrahlung), die sonst von der Erdatmosphäre absorbiert werden. So hatte zum Beispiel die 1973 gestartete Raumstation Skylab unter anderem ein Röntgenteleskop an Bord.

Mit Hilfe von Raumsonden versuchte man unter anderem der Sonne näher zu kommen, um die Umgebung der Sonne studieren zu können. Dies war und bleibt aufgrund von sehr hohen Temperaturen und intensiver Strahlung ein technisch sehr schwieriges Unterfangen. So konnten die 1974 und 1976 gestarteten deutsch-amerikanischen Helios-Sonden sich der Sonne nur bis auf 43,5 Millionen Kilometer nähern.

Die 1990 gestartete Raumsonde Ulysses verfolgte andere Ziele. Sie sollte die Pole der Sonne studieren, die sowohl von der Erde als auch von Satelliten und Raumsonden aus, die sich in der Planetenebene bewegen, nicht sichtbar sind. Dies war nur mit einer Änderung der Bahnebene der Raumsonde um  $90^\circ$  erreichbar. Zu diesem Zweck flog Ulysses zunächst zum Riesenplaneten Jupiter, wo durch ein Swing-By-Manöver die Bahnebene der Sonde geändert wurde. Dadurch konnte Ulysses die Planetenebene verlassen und überflog seitdem bereits zweimal die beiden Pole der Sonne. Mit konventionellen Raketenantrieben, ohne den Vorbeiflug am Jupiter, wäre eine solche Mission nicht möglich gewesen.

1995 wurde die größtenteils von Europa gebaute Sonde SOHO in Richtung Sonne gestartet. SOHO befindet sich nun im Lagrangeunkt L1 und beobachtet die Sonne mit zwölf verschiedenen Instrumenten. Sie liefert tägliche Aufnahmen der Sonne und trägt wesentlich der Vorhersage der Sonneneruptionen und Stürme bei. 1998 folgte der Satellit TRACE zur Unterstützung von SOHO.

2001 startete die Genesis-Raumsonde, die kurz darauf eine Position im Lagrangepunkt L1 bezog und dort zweieinhalb Jahre lang Proben des Sonnenwindes sammelte, die anschließend zur Erde gebracht werden sollten. Dadurch sollte die genaue Isotopenzusammensetzung des Sonnenwindes ermittelt werden. Im September 2004 trat die Kapsel in die Erdatmosphäre ein, schlug jedoch aufgrund eines nicht entfalteten Fallschirms hart auf der Erde auf. Einige der Proben haben den Aufprall dennoch überstanden und werden derzeit von Wissenschaftlern studiert.

Für 2013 plant die europäische Raumfahrtbehörde ESA eine Raumsonde namens Solar Orbiter, die sich der Sonne bis auf 45 Sonnenradien (etwa 30 Millionen Kilometer) nähern und dabei Strukturen von 100 km Größe auflösen können soll.

### Sichtbare Erscheinungen und Beobachtung der Sonne

Mit Teleskopen kann man Aktivitäten der Sonne in Form von Protuberanzen und Sonnenflecken sichtbar machen. Ebenfalls zu beobachten sind dort heftige Ausbrüche, so genannte Flares, die bereits mit kleinen Instrumenten als hellere und damit heißere Gebiete erkennbar sind.

Die Sonnenbeobachtung geschieht am einfachsten, indem das Okularbild eines Teleskops oder Fernglases auf eine weiße Fläche (zum Beispiel eine Leinwand oder ein Stück Pappe) projiziert wird. Die Abbildung der Sonne kann gefahrlos betrachtet werden. Dieses Verfahren nennt man Okularprojektion.

Ebenfalls möglich ist eine Beobachtung mit Hilfe von speziellen Sonnenfiltern, dies sind Folien oder beschichtete Gläser, die vor das Auge gehalten oder vor dem Objektiv angebracht werden. Eine detaillierte Beobachtung ist außerdem mit einem Herschelpisma oder Pentaprisma möglich.

Bei allen beschriebenen Beobachtungsverfahren wird das gesamte Spektrum des Sonnenlichts gedämpft, die Sonne wird im »Weißlicht« beobachtet. Dabei werden Sonnenflecken, Flares und die Granulation sichtbar.

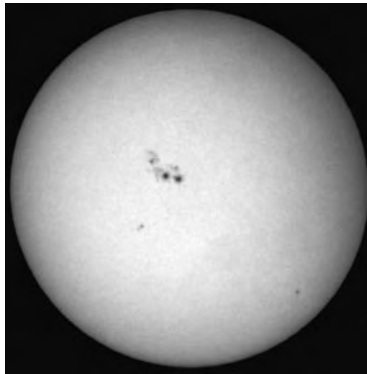


Abb. 11: Sonnenbeobachtung mit einem Spektiv nach der Projektionsmethode

Um Protuberanzen zu beobachten, bedarf es besonderer Bauteile oder Teleskope. Bei einem Protuberanzenansatz wird die Sonne mittels eines Scheibchens abgedeckt – es wird sozusagen eine künstliche totale Sonnenfinsternis erzeugt. Die am Sonnenrand aufsteigenden Protuberanzen werden durch einen sog. *H-alpha-Filter* beobachtet. Dies ist ein besonders schmalbandiger Interferenzfilter, der nur das tiefrote Licht des ionisierten Wasserstoffes durchlässt. Eine Beobachtung der gesamten Sonnenoberfläche in diesem Spektralbereich ermöglichen sog. H-alpha-Teleskope. Damit können Protuberanzen, Filamente, Flecken und Flares beobachtet werden. Diese Teleskope sind in den letzten Jahren sehr preisgünstig geworden und werden von Amateurastronomen zunehmend eingesetzt.

Die Korona kann nur bei einer totalen Sonnenfinsternis oder mittels eines speziellen Gerätes, dem Koronographen, beobachtet werden.

Mit freiem Auge kann die Sonne lediglich bei dunstigem Himmel kurz nach Sonnenaufgang oder kurz vor Sonnenuntergang betrachtet werden. Die → Erdatmosphäre schluckt den größten Teil des Lichts, insbesondere auch der UV-Strahlung. Allerdings verringert die Atmosphäre in Horizontnähe auch stark die Abbildungsqualität und bewirkt eine vertikale Stauchung des Sonnenbildes als Folge der Lichtbrechung. Dass die untergehende Sonne in Horizontnähe größer aussieht, ist hingegen nicht, wie oft vermutet, eine Folge der Refraktion an den Luftschichten, sondern eine optische Täuschung, die von der Wahrnehmungspsychologie unter dem Begriff Mondtäuschung untersucht und erklärt wird.

## Entwicklung der Sonne

Die Sonne entstand vor 4,6 Milliarden Jahren durch den gravitativen Kollaps einer interstellaren Gaswolke. Dieser Kollaps, in dessen Verlauf auch die Planeten entstanden, und die anschließende Relaxationsphase war nach etwa 50 Millionen Jahren abgeschlossen. Die anschließende Entwicklungsgeschichte der Sonne führt über ihren jetzigen Zustand zu dem eines Roten Riesen und schließlich über eine instabile Endphase im Alter von etwa 12,5 Milliarden Jahren zu einem Weißen Zwerg, der von einem Planetarischen Nebel umgeben ist.

Dieser Ablauf lässt sich heute anhand der Gesetze der Physik und der Kenntnis kernphysikalischer Prozesse aus Laborexperimenten recht genau im Computer modellieren. Die Kenndaten der einzelnen Phasen sind in der Tabelle angegeben. Der Index Null markiert die heutigen Kenndaten der Sonne, das heißt im Alter von 4,6 Milliarden Jahren.

Phase	Dauer in Millionen J.	Leuchtkraft / L <sub>0</sub>	Radius / R <sub>0</sub>
Hauptreihenstern	11.000	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase	700	2,3	1,6–2,3
Roter Riese	600	2,3–2.300	2,3–166
Beginn des He-Brennens	110	44	etwa 10
He-Schalenbrennen	20	44–2.000	10–130
Instabile Phase	0,4	500–5.000	50–200
Übergang zu Weißen Zwerg mit Planetarischem Nebel	0,1	3.500	100–0,08

**Protostern** – Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren zog sich eine riesige Gas- und Staubwolke unter der eigenen Schwerkraft zusammen. Im Zentrum der Wolke wurde die Materie immer dichter zusammen gepresst, wobei Druck und Temperatur immer weiter anstiegen. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits große Energiemengen in Form von Strahlung abgegeben. Dieses Stadium nennt man einen Protostern.

**Hauptreihenstern** – Die Temperatur und der Druck im Zentrum stiegen so weit an, bis die Kernfusionsprozesse einsetzten. Dadurch wurde ein Strahlungsdruck wirksam, der der Schwerkraft entgegenwirkte. Die weitere Kontraktion wurde aufgehalten, der Stern stabilisierte sich. Die Sonne hatte das Stadium eines so genannten Hauptreihensterns erreicht. In dieser Phase verweilt sie elf Milliarden Jahre. In dieser Zeit steigt die Leuchtkraft um das Dreifache von 0,7 L<sub>0</sub> auf 2,2 L<sub>0</sub> und der Radius auf fast

das Doppelte von  $0,9R_0$  auf  $1,6R_0$  an. Im Alter von fünfeinhalb Milliarden Jahren, das heißt in 900 Millionen Jahren ab heute, überschreitet die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche den für höhere Lebewesen kritischen Wert von  $30^\circ\text{C}$ . Eine weitere Milliarde Jahre später werden  $100^\circ\text{C}$  erreicht. Spätestens in Alter von 9,4 Milliarden Jahren versiegt der Wasserstoff im Sonnenzentrum, und die Fusionszone verlagert sich in einen schalenförmigen Bereich um das Zentrum, der sich im Laufe der Zeit weiter nach außen bewegt. Dieser Vorgang führt jedoch vorerst nicht zu einer Veränderung der äußerlich sichtbaren Sonnenparameter.

Im Zeitraum von 11 bis 11,7 Milliarden Jahren beginnt eine Kontraktionsphase der ausgebrannten Kernzone aus Helium. Dabei wächst der Sonnenradius auf  $2,3R_0$  an. Die Sonne wird rötlicher und beginnt sich von der Hauptreihe im so genannten Hertzsprung-Russell-Diagramm zu entfernen. Bis zu diesem Zeitpunkt beträgt der Massenverlust durch Sonnenwind weniger als ein Promille.

**Roter Riese** – Im Zeitraum von 11,7 bis 12,3 Milliarden Jahren setzt ein dramatisch beschleunigter Anstieg von Leuchtkraft und Radius ein. Durch die Zunahme der Oberfläche strahlt die Sonne noch rötlicher. In der Endphase dieser Entwicklung erreicht die Sonne eine Leuchtkraft von  $2.300L_0$  und einen Radius von  $166R_0$ . Das entspricht etwa dem Radius der Umlaufbahn der  $\rightarrow$ Venus. Venus und  $\rightarrow$ Merkur werden vernichtet. Von der Erde aus gesehen nimmt die Sonne nun einen großen Teil des Himmels ein, und die Erdkruste wird zu einem einzigen Lava-Ozean aufgeschmolzen. Durch die geringe Gravitation an der Sonnenoberfläche verliert die Sonne in dieser Phase 28 % ihrer Masse durch Sonnenwind. Gegen Ende dieser Phase strömt ein Anteil von bis zu  $1,3 \cdot 10^{-7} M_0$  pro Jahr als interstellares Gas in den Weltraum, wobei  $M_0$  die Masse der heutigen Sonne bezeichnet. Durch die geringere Sonnenmasse sinkt auch die Anziehungskraft auf die Planeten, so dass deren Bahnradien um jeweils 38 % zunehmen. Da die Kernzone der Sonne keine Energie mehr produziert, gibt sie der Gravitation weiter nach und kontrahiert, bis schließlich die Dichte ungefähr auf das 10.000fache des heutigen Wertes angestiegen ist.

**Helium-Blitz und -Brennphase** – Durch die Kontraktion der Zentralregion steigt dort die Temperatur schließlich auf  $10^8\text{K}$ . Bei diesem Wert setzt die Fusion von Helium zu Kohlenstoff ein. Aufgrund der extremen Dichte in der Größenordnung  $10^6\text{g/cm}^3$  im Zentrum und der damit verbundenen

Neutrino-Kühlung zündet die Fusionsreaktion zunächst innerhalb einer heißeren kugelschalenförmigen Zone um das Zentrum. Gewöhnlich würde die dabei freiwerdende Energie zu einer Expansion des Kerns führen, die die Temperatur stabilisiert. Die Kernzone befindet sich jedoch in einem besonderen quantenmechanischen Entartungszustand, was zur Folge hat, dass die Energie zunächst in die Auflösung der Entartung investiert wird. Daher ist zunächst kein stabiler Zustand möglich, so dass die Heliumfusion in Form einer gigantischen Explosion einsetzt, die als Helium-Blitz (*helium flash*) bezeichnet wird. Dabei steigt für mehrere Sekunden die Sonnenleistung auf  $10^{10}L_0$ . Das entspricht etwa 10 % der Leuchtkraft der gesamten Milchstraße. Erst nach einem Umsatz von 3 % des Heliumreservoirs setzt eine Expansion ein und stoppt diese Leistungsexkursion. Diese Explosion findet nur im Zentralbereich statt und ist äußerlich zunächst nicht bemerkbar. Sie drängt jedoch die Wasserstoffusionszone weiter nach außen, deren Temperatur daher abnimmt und damit auch der Energieumsatz. Paradoxe Weise sinkt damit als äußerliche Folge des Helium-Blitzes innerhalb der nächsten 10.000 Jahre die Leuchtkraft ab und zwar fast um den Faktor 100. Es folgt eine Phase von einer Million Jahren, in denen die Sonnenparameter oszillieren, bis sich ein stabiler Zustand der Heliumfusion im Zentrum einstellt, der anschließend 110 Millionen Jahre anhält. Gleichzeitig brennt auch die schalenförmige Wasserstoffusionszone weiter nach außen weiter. In dieser Zeit bleibt die Leuchtkraft nahezu konstant bei  $44L_0$  und der Radius bei  $10R_0$ .

**Heliumschalen-Brennen** – Danach ist auch das Helium im Sonnenzentrum verbraucht, und es beginnt eine Phase des Heliumschalen-Brennens, die 20 Millionen Jahre andauert. Es existieren nun zwei ineinander geschachtelte schalenförmige Fusionszonen. Im Zentrum sammelt sich Kohlenstoff und kontrahiert gravitativ. Damit ist ein erneuter enormer Anstieg der Leuchtkraft auf  $2.000L_0$  und eine Zunahme des Radius auf  $130R_0$  verbunden. Gegen Ende verliert die Sonne dabei einen Massenanteil von  $0,1M_0$ .

In den letzten 500.000 Jahren dieser Phase erwartet man in Zusammenhang mit der Wechselwirkung zwischen dem kontrahierenden Kern und der Heliumfusionszone weitere instabile Situationen, bei denen kurzzeitige Leistungsexkursionen durch Heliumfusion mit etwa  $10^6L_0$  eintreten können. Ein wahrscheinliches Szenarium wären beispielsweise vier solcher Helium-Blitze im Abstand von etwa 100.000 Jahren. Als Folge jedes dieser Helium-Blitze und der damit verbundenen Expansion



der Wasserstoffschale kann die Fusion dort in den folgenden 200 Jahren vorübergehend völlig zum Stillstand kommen. Die äußerliche Folge eines Helium-Blitzes wäre daher wiederum zunächst eine Abnahme der Leuchtkraft. Nach 400 Jahren erreicht die Energie des Helium-Blitzes die Oberfläche. Leuchtkraft und Radius steigen an und relaxieren in den folgenden 10.000 Jahren wieder. Dabei werden Variationen der Leuchtkraft zwischen  $500 L_0$  und  $5.000 L_0$  erwartet sowie Radiusvariationen zwischen  $50 R_0$  und  $200 R_0$ . In den Phasen maximaler Ausdehnung reicht die Sonnenoberfläche bis an die heutige Erdbahn heran. Nur durch die Zunahme des Erdbahndurchmessers entkommt die Erde der völligen Vernichtung. Gleichzeitig stößt die Sonne in diesen Phasen insgesamt eine Masse von weiteren  $0,05 M_0$  ab.

**Weißer Zwerg und Planetarischer Nebel** – Durch die erwähnten Massenverluste verliert die Sonne die gesamte äußere Hülle einschließlich der Wasserstoff- und Heliumfusionszone. Etwa 100.000 Jahre nach dem letzten Helium-Blitz wird daher der heiße innere Kern freigelegt, der im Wesentlichen aus hochverdichtetem Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Sein Radius beträgt nur noch  $0,08 R_0$ , dafür aber seine Oberflächentemperatur  $120.000 \text{ K}$ . Seine Leuchtkraft beträgt anfänglich  $3.500 L_0$ . Aufgrund der hohen Temperatur enthält diese Strahlung einen enormen Anteil von ultravioletter Strahlung, welche die abgestoßene Gaswolke der Sonne nun zum Leuchten anregt. Da die Geschwindigkeit des Sonnenwindes ständig zunimmt, werden die früher ausgestoßenen Gase durch die späteren eingeholt und oft zu einer kugelförmigen Gasschale komprimiert. Für einen außen stehenden Beobachter erscheinen die leuchtenden Gase in diesem Fall als Ring, der als Planetarischer Nebel bezeichnet wird. Durch das Verflüchtigen des Gases erlischt diese Erscheinung nach einigen 10.000 Jahren wieder, und im Zentrum bleibt der strahlende Rest der Sonne, den man als Weißen Zwerg bezeichnet.

Er hat nur etwa die Größe der Erde, aber eine Masse von  $0,55 M_0$ . Seine Dichte beträgt daher etwa eine Tonne pro Kubikzentimeter. Er besitzt keine innere Energiequelle, so dass seine Abstrahlung zu einem Wärmeverlust führt. Nach einer vergleichsweise raschen Abkühlung im Anfangsstadium durch die extreme Leuchtkraft sinkt die Oberflächentemperatur auf Werte, bei denen eine Strahlung aufgrund der deutlich niedrigeren Leuchtkraft über mehrere dutzend Milliarden Jahre möglich ist, bevor die Sonne als Schwarzer Zwerg im optischen Spektralbereich gänzlich erlischt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonne>. Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Wolfgangbeyer, Bricktop1, SiriusB, CWitte, Geof, Wing, Marc Layer, Kookaburra, StephanPsy, Lotse, Allen McC., Saperaud, Rivi, Arnomane, Case-Berlin, Phrood, Fisch1917, Ben-Zin, Zwobot, Media lib, Schusch, Matze6587, Anton J Gamel, StarFighter, LaZeR, Nephelin, RolandHagemann, Kiko2000, Xorx77, ErikDunsing, Biobertus, Mps, Ken Iso, Korelstar, Stefan h, Koethnig, Martin-vogel, Togo, The Hawk, BitterMan, Liquidat, Traitor, Neitram, Boemmels, Bdk, Apostate Tutor, Odin, Mr. B.B.C., AndreasB, RobbyBer, Srbauer, AlphaCentauri, Head, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

## Sonnenwind

Der Sonnenwind ist ein Strom geladener Teilchen, der von der Sonne ins All strömt. Gelegentlich wird insbesondere in der Presse auch der falsche Begriff *Sonnenstaub* verwendet, was insbesondere bei der Berichterstattung zur Genesis-Sonde der Fall war.

### Entstehung und Zusammensetzung

Der Sonnenwind besteht hauptsächlich aus Protonen und Elektronen sowie aus Heliumkernen (Alphaeteilchen); andere Atomkerne und nicht ionisierte (elektrisch neutrale) Atome sind nur in kleinem Umfang vorhanden. Obwohl der Sonnenwind aus den äußeren Schichten der Sonne stammt, spiegelt er die Elementhäufigkeit dieser Schichten der Sonne nicht exakt wider, da durch Fraktionierungsprozesse (FIP-Effekt) manche Elemente im Sonnenwind angereichert beziehungsweise verdünnt werden. Im Inneren der Sonne wurden die Elementhäufigkeiten durch die dort stattfindende Kernfusion geändert. Da die äußeren Schichten der Sonne jedoch nicht mit den inneren Schichten gemischt sind, entspricht deren Zusammensetzung noch der Zusammensetzung des Urnebels, aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat. Die Erforschung des Sonnenwindes ist deshalb auch interessant, um sowohl auf die chemische Zusammensetzung als auch auf die Isotopenhäufigkeiten des Urnebels schließen zu können.

Die Sonne verliert durch den Sonnenwind pro Sekunde etwa eine Million Tonnen ihrer Masse. Man unterscheidet den langsamen und den



Abb. 12: Ein Experiment zur Erforschung des Sonnenwindes. Das Sonnenwindsegel wird von Aldrin ausgerichtet.

schnellen Sonnenwind. Die Geschwindigkeit des langsamen Sonnenwinds liegt bei etwa 400 Kilometern pro Sekunde, der schnelle Sonnenwind, der an den koronalen Löchern austritt, erreicht 800–900 Kilometer pro Sekunde. In Erdnähe hat der Sonnenwind eine Dichte von etwa  $5 \cdot 10^6$  Teilchen pro  $m^3$ .

### Auswirkungen des Sonnenwinds

Da der Sonnenwind aus elektrisch geladenen Teilchen besteht, stellt er ein Plasma dar, das sowohl das Magnetfeld der Sonne wie auch das der Erde verformt. Das irdische Magnetfeld hält den Teilchenschauer zum größten Teil von der Erde ab. Nur bei einem starken Sonnenwind können die Teilchen in die hohen Schichten der Atmosphäre eindringen und dort Polarlichter hervorrufen, ebenso wie auf anderen Planeten mit einem Magnetfeld. Starke Sonnenwinde haben auch Einfluss auf die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen und können unter anderem den Kurzwellenfunk und die Kommunikation mit Satelliten stören.

Ein deutlich sichtbares Anzeichen für die Existenz des Sonnenwinds liefern die Kometen: Kometenschweife zeigen immer von der Sonne weg, denn die Gas- und Staubeilchen, welche die Koma und den Schweif bilden, werden vom Sonnenwind mitgerissen.

Der Sonnenwind reicht weit bis über die äußeren Planetenbahnen hinaus. Er treibt das interstellare Gas aus dem Sonnensystem hinaus und bildet eine Art Blase im Weltall, welche Heliosphäre genannt wird. Die Grenze der Heliosphäre, an der die Teilchen des Sonnenwinds abgebremst werden, heißt Heliopause. Sie wird oft als die Grenze des Sonnensystems angesehen. Die genaue Entfernung ist nicht bekannt, Beobachtungen der Raumsonde Voyager 2 geben Grund zu der Annahme, dass sich die Heliopause in etwa der vierfachen Entfernung des Plutos befindet.

### Entdeckung und Erforschung

Bereits 1859 beobachtete der Forscher Richard Carrington einen Zusammenhang zwischen Sonnenflares und zeitlich versetzten irdischen Magnetfeldstürmen, was – obwohl damals unerklärlich – ein frühes Indiz für die Existenz des Sonnenwinds war. Anfang des 20. Jahrhunderts vertrat der norwegische Physiker Kristian Birkeland die Auffassung, die Polarlichter würden durch Teilchenströme von der Sonne ausgelöst. Seine Idee wurde jedoch ebenso wenig ernst genommen wie die des deutschen Physikers Ludwig Biermann, der eine »Solare Teilchenstrahlung« annahm, um die Richtung der Kometenschweife erklären zu können.

Astronomen war aufgefallen, dass die Kometenschweife nicht exakt von der Sonne weg gerichtet waren, sondern einen kleinen Winkel dazu aufwiesen. Biermann erklärte diese Eigenschaft 1951 durch die Bewegung des Kometen in einem sich ebenfalls bewegenden Teilchenstrom, gewissermaßen ein seitliches Abdriften durch die Strömung. E.N. Parker hat 1959 die englische Bezeichnung *solar wind* eingeführt und eine magnetohydrodynamische Theorie zur Beschreibung des Sonnenwinds vorgeschlagen.

Die Existenz des Sonnenwinds konnte erst 1959 durch die sowjetische Lunik 1 und 1962 durch die amerikanische Raumsonde Mariner 2 auf ihrem Weg zur Venus experimentell bestätigt werden. Ein weiterer Meilenstein in der Erforschung des Sonnenwinds waren die Sonnenwindsegel, welche mit Ausnahme von Apollo 13 und 17 bei allen Mondlandungen aufgestellt wurden und Daten über die Isotopenhäufigkeiten der Edelgase Helium, Neon und Argon im Sonnenwind lieferten. Viele weitere Missionen haben zum Verständnis des Sonnenwinds beigetragen. Die Raumsonden Pioneer 10/11, Voyager 1/2 und die Ulysses-Mission lieferten Daten des Sonnenwinds außerhalb der Erdumlaufbahn, während Helios 1/2 und die Mariner- und Pioneer-Missionen zur Venus sowie russische Vega-Sonden Daten von innerhalb der Erdumlaufbahn lieferten. IMP 1–8, AIMP 1/2, ACE, ISEE 1–3 Sonden sowie das Sonnenobservatorium SOHO und die Raumsonde Wind lieferten Sonnenwinddaten in Erdnähe. Die Ulysses-Mission lieferte auch Daten über den Sonnenwind außerhalb der Ekliptik. Im Jahr 2001 wurde die Genesis-Mission gestartet bei welcher hochreine Kristalle in einem der Lagrange-Punkt L1 des Erde-Sonne-Systems dem Sonnenwind ausgesetzt wurden und danach zur Untersuchung zur Erde zurückgebracht werden sollten. Die Mission schlug jedoch bei ihrem Abschluss im Jahr 2004 fehl, da die Kapsel, in der die Sonnenwindteilchen zur Erde transportiert werden sollten, nicht wie geplant von einem Fallschirm abgebremst und dann von einem Helikopter aufgefangen wurde, sondern auf dem Boden zerschellte, da sich der Fallschirm nicht geöffnet hatte.

Es gibt Bemühungen, den Sonnenwind mithilfe von Sonnensegeln zum Antrieb von Raumfahrzeugen zu nutzen.

*Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind>. Historie: 1.11.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Ben-Zin, Arnomane, ChristophDemmer, Gunter.krebs, Neo23, Zwobot, Raimar, Stw, Zeep, Stephan75, Ambrosius, Hella, Dapete, RedBot, Kurt Jansson, AlexR, Lentando, Uxh, Bobbl, Jörny, anonym. 21.9.05–31.1.06: WikiPress-Redaktion.*