

# Die Sonne : unser Stern

Autor(en): **Völkle, Hansruedi**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles =  
Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg**

Band (Jahr): **102 (2013)**

PDF erstellt am: **18.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-391956>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Die Sonne - unser Stern

HANSRUEDI VÖLKLE

Physikdepartement der Universität Freiburg

## Kurzfassung

Die Sonne ist unsere wichtigste Energiequelle und das faszinierendste Objekt am Himmel. Sie ist denn auch Gegenstand vieler Religionen und Mythologien und hat die Wissenschaft seit jeher beschäftigt. Im Artikel wird – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einiges wissenswertes über die Sonne präsentiert, so etwa deren physikalische Daten, ihr Energieerzeugungsprozess, ihren Lebenszyklus' und weiteres Informationsmaterial.

## 1. Die Sonne – Für uns riesig und doch ein eher kleiner Stern

Die Sonne ist bei weitem das auffälligste Objekt an unserem Himmel. Obwohl sie mit 1.392 Millionen km Durchmesser im Vergleich zu unserer Erde riesig ist, ist sie doch ein eher kleiner Stern. Mit  $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$  kg macht sie jedoch rund 99.9 % der Masse unseres Sonnensystems aus – übrigens ganz ähnlich wie beim Vergleich des Atomkerns zu den diesen umkreisenden Elektronen. Sie ist im Wesentlichen ein aus Plasma (ein ionisiertes Gas, bei dem Kerne und Elektronen getrennt sind) bestehender Gasballon. Ihre mittlere Dichte ist mit  $1.408 \text{ g/cm}^3$  rund 4-mal kleiner als jene der Erde; der Kern der Sonne hat jedoch eine bis 100-mal grössere Dichte als der Mittelwert der Sonne.

Dass die Sonne kein sehr grosser Stern ist, ist für das Leben auf der Erde ein Vorteil. Denn je grösser ein Stern ist, umso schneller hat er seinen Brennstoff – den Wasserstoff – verbraucht. Das leuchtet ein, wenn man berücksichtigt, dass die Leuchtkraft  $L_s$  eines Sterns gemäss empirischen Daten etwa in proportional zu Masse hoch 3.5 ist, also:

$$L_s \sim M_s^{3.5} \quad (1)$$

Beim Radius wurde ebenfalls eine empirische Beziehung gefunden:

$$R_s \sim M_s^{0.78} \quad (2)$$

Die Hauptsequenz-Lebensdauer eines Sternes ergibt sich aus der in Energie umgerechneten Brennstoffmasse (Wasserstoff), dividiert durch seine Leuchtkraft. Dabei wird angenommen, dass der Stern während der Hauptsequenz (Main Sequence, s. Abb. 6) rund 10 % seiner Wasserstoffreserven zu Helium verbrennt und dadurch 0.7 Prozent seiner Masse verliert. Man erhält:

$$T_{\text{Main Sequence}} \approx 0.007 \cdot 0.1 \cdot M_{\odot} \cdot c^2 / L_{\odot} \approx 10^{10} \text{ Jahre} \quad (3)$$

Allgemein formuliert: Gesamtenergie  $E = Mc^2$  dividiert durch die Leuchtkraft:

$$T_{\text{Main Sequence}} \approx E_s / L_s = M_s c^2 / L_s \sim M_s^{2.5} c^2 \quad (4)$$

Relativ zur Lebensdauer der Sonne ergibt sich somit für die Dauer der Main Sequence (MS) eines Stern:

$$T_s / T_{\odot} \approx 10^{10} \text{ y} (M_s / M_{\odot}) / (L_s / L_{\odot}) = 10^{10} \text{ y} (M_s / M_{\odot})^{-2.5} \quad (5)$$

Ein 30-mal massereicherer Stern als die Sonne hat somit seinen Wasserstoffvorrat bereits nach 2 Millionen Jahren verbraucht, während diese Phase bei unserer Sonne rund 10 Milliarden Jahre dau-

ert. Zwei Millionen Jahre würden allerdings für die Entwicklung des Lebens auf der Erde nicht ausreichen, sie hat hierfür rund 3.5 Milliarden Jahre benötigt. Als die Erde vor 4.5 Milliarden Jahren entstand, war das Universum bereits 9.2 Milliarden Jahre alt. Zurzeit ist die Sonne gerade Mal bei der Hälfte ihrer Lebensdauer angelangt; sie hat somit noch Brennstoff für weiter rund fünf Milliarden Jahre. Sterne mit weniger als einem Zehntel der Sonnenmasse sind dagegen zu klein um die Wasserstofffusion zu zünden.

Der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne beträgt 149 Millionen km und wird als astronomische Einheit (AU) bezeichnet. Bei der Methode der Parallaxe wird sie als Basis für die Bestimmung der Entfernung von Sternen im näheren Umfeld der Erde. Die Einheit:

$$1 \text{ pc (parsec)} = 3.2616 \text{ Lichtjahre} \quad \text{oder:} \quad 1 \text{ pc} = 3.0857 \cdot 10^{16} \text{ m} \quad (6)$$

entspricht derjenigen Distanz, bei der die Astronomische Einheit unter einem Winkel von einer Bogenminute erscheint. Unser Sonnensystem befindet sich am Rande der Milchstrasse, rund 28'000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt und bewegt sich mit rund 250 km/s auf einer fast kreisförmigen Bahn um das Zentrum der Milchstrasse und braucht für eine Umrundung rund 210 Millionen Jahre. Die Erdbahn ist ebenfalls annähernd kreisförmig, die Exzentrizität  $\epsilon$  beträgt lediglich 0.0167 und ist folgendermassen definiert:

$$\epsilon = (r_{\max} - r_{\min}) / (r_{\max} + r_{\min}) \quad (7)$$

## 2. Die Sonne: Unsere Energiequelle und deren Strahlungsspektrum (Abb. 1)

Die Sonne ist unsere Hauptenergiequelle. Sie besteht zu 71.0 % aus Wasserstoff und 27.1 % aus Helium. Die restlichen 1.9 % aus den Elementen Sauerstoff (0.97 %), Kohlenstoff (0.40 %), Stickstoff (0.096 %), Silizium (0.099 %), Magnesium (0.076 %), Neon (0.058 %), Eisen (0.14 %) und Schwefel (0.040 %). (*Zur Häufigkeit der Elemente in unserem Sonnensystem: s. Abb. 2.*) Die Sonne bestrahlt uns, gemittelt über die gesamte Erdoberfläche, sowie über das ganze Jahr und über 24 Stunden, mit  $237 \text{ W/m}^2$ . Die «eigenen» Energiequellen der Erde sind im Vergleich dazu sehr gering.

Betrachtet man die mittlere Sonneneinstrahlung im Abstand der Erde auf eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  senkrecht zur Richtung der Sonneneinstrahlung, so erhält man einen Wert von  $1367 \text{ W/m}^2$ . Man nennt diese Grösse die **Solarkonstante**. Genau genommen ist sie allerdings nicht konstant, deren Schwankungen sind jedoch äusserst gering:

*infolge der schwachen **Exzentrizität** der Erdbahn um etwa  $\pm 3.5 \%$   
infolge des 11-jährigen **Sonnenzyklus** um  $\pm 0.1 \%$   
infolge der **Alterung** der Sonne um  $-1 \%$  in  $10^8$  Jahren*

Mit dem  $1/r^2$ -Abstandsgesetz lässt sich die **Leuchtstärke**, also die Energie berechnen, welche die Sonne pro Sekunde abstrahlt, unter der Annahme, dass sie nach allen Seiten gleichmässig strahlt:

$$L_{\odot} = 3.846 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (8)$$

Bezogen auf die Sonnenoberfläche beträgt deren **Intensität**:

$$I_{\odot} \approx 6.49 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (9)$$

Mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für die Strahlung eines **schwarzen Körpers**:

$$I = \sigma T^4 \quad (10)$$

erhält man für die **Oberflächentemperatur** der Sonne einen Wert von  $\approx 5800$  K. Dabei ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante mit:

$$\sigma = 2\pi^5 k_B^4 / (15h^3 c^2) \approx 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad (11)$$

und die **Boltzmann-Konstante**  $k_B = 1.380 \cdot 648 \cdot 8 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8.614 \cdot 332 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$  (12)

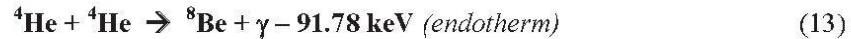
Die Sonnenstrahlung überdeckt als kontinuierliches **Spektrum** einen weiten Bereich von harter Röntgenstrahlung bis in den Bereich der Radiowellen mit einem Maximum im sichtbaren Bereich bei Gelb-Grün ( $\lambda \approx 500$  nm). Sie entspricht in ihrer Intensitätsverteilung recht gut demjenigen eines Schwarzkörpers mit der Temperatur von 5800 K (s. Abb. 3 oben). Im kontinuierlichen **Sonnenpektrum** sind Absorptionslinien (*Fraunhofer'sche Linien*) als dunkle Stellen sichtbar. Sie kommen daher, dass das von der Sonnen-Korona emittierte Licht die Photosphäre durchquert, und dort von den verschiedenen Elementen der Sonnenatmosphäre (H, He, O, Na, ...) durch Resonanzabsorption geschwächt oder absorbiert wird.

Die Energieerzeugung in der Sonne geschieht durch einen thermonuklearen, also einen **Kernfusions-Prozess**: Die Sonne ist somit physikalisch gesehen ein Kernreaktor. Bei diesem Prozess wird im wesentlichen Wasserstoff zu Helium verschmolzen. Dabei ist, neben andern, der **pp-Prozess** der wichtigste. Damit zwei Protonen die Coulomb-Abstossung überwinden und sich näher als 0.2 fm ( $2 \cdot 10^{-16}$  m) kommen um zu fusionieren, brauchen sie eine Energie die einer Temperatur der Maxwell-Verteilung von etwa  $10^{10}$  K entspricht. Es ist interessant, dass das als hypothetisches Zwischenprodukt entstehende Di-Proton ( ${}^2\text{He}$ -Kern) aufgrund des Pauli-Prinzips nicht gebunden ist und sich rasch in ein  ${}^2\text{H}$  (Deuteron) plus Positron ( $e^+$ ) und Neutrino ( $\nu_e$ ) umwandelt. Wie auf der Abb. 3 unten ersichtlich, werden bei den meisten Prozessen in der Sonne auch **Neutrinos** freigesetzt. Bei einem Teilchen ist dieses monoenergetisches [ $\langle m \rangle$  *monoenergetisch*], bei zwei, haben sie eine Energieverteilung, die von Null bis zur Maximalenergie reicht [ $\langle V \rangle$  *Verteilung*] (s. Abb. 3 unten).

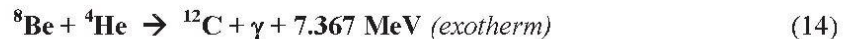
Die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Helium-Kern setzt eine Energie von 26.7 MeV frei. Aus  $4 \times L_{\odot} [\text{MeV}] / 26.7 [\text{MeV}]$  ergibt sich, dass pro Sekunde  $3.37 \cdot 10^{38}$  Protonen verbraucht werden, also rund 564 Millionen Tonnen Wasserstoff. Rechnet man die Leuchtstärke in einen Massenverlust um, so erhält man, dass die Sonne pro Sekunden um etwa 4.3 Millionen Tonnen leichter wird. Durch den **Sonnenwind** verliert sie eine weitere Million Tonnen pro Sekunden. Das scheint viel zu sein: Bis zum Ende des Wasserstoffzyklus, d.h. nach 11 Milliarden Jahren wird die Sonne jedoch nur um 1 % leichter sein und hat dann 10 Prozent ihres Wasserstoffs verbrannt. Bei einer Gesamtmasse der Sonne von  $M_{\odot} = 1.988 \cdot 10^{30}$  kg und einem Wasserstoffanteil von 73.5% ergibt sich eine ungefähre Lebensdauer der Sonne, bis 1/10 des Wasserstoffes verbraucht ist von 10 Milliarden Jahren; s. auch Gleichung (3).

Bei dieser Verschmelzung von 4 Protonen in einen Heliumkern werden zwei der Protonen durch einen schwachen Prozess in Neutronen umgewandelt, es entstehen auch je zwei **Neutrinos** und Positronen (Abb. 1). Die Sonne produziert rund  $1.7 \cdot 10^{38}$  Elektronen-Neutrinos ( $\nu_e$ ) pro Sekunde. Auf der Erde müssten demzufolge rund 65 Milliarden Neutrinos ( $\nu_e$ ) pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde ankommen. Experimente haben jedoch weniger als diese Anzahl Elektronen-Neutrinos ( $\nu_e$ ) nachgewiesen. Dieses Rätsel blieb lange ungelöst bis man herausfand, dass die Neutrinos **oszillieren**, d.h. sich auf dem Weg von der Sonne zur Erde und auch beim Durchqueren dieser in andere Neutrino-Arten ( $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$ ) umwandeln. Berücksichtigt man dies, dann stimmt die Neutrino-Bilanz.

Nebst der Hauptreaktion (*der erwähnten pp-Kette gem. Abb. 1*) kommen mit geringerer Wahrscheinlichkeit auch andere Reaktionen vor, wie in der Abb. 1 unten dargestellt. Die folgende Reaktion ist der **3-Alpha-Prozess** am Ende des Wasserstoffzyklus, der Temperaturen von über  $10^8$  Kelvin erfordert und explosionsartig mit dem so genannten Helium-Flash einsetzt:



sowie:

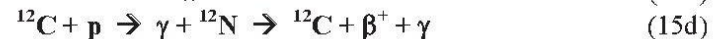
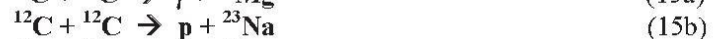


Summarisch verschmelzen hier 3  $\alpha$ -Teilchen zu einem  ${}^{12}\text{C}$ -Kern. Die schwereren Elemente entstehen durch den nachfolgenden CNO- oder **Bethe-Weizsäcker-Prozess** (s. Tabelle 1). Der am Schluss entstandene  ${}^{12}\text{C}$ -Kern beginnt dabei oben auf der Tabelle den Prozess aufs Neue mit erneuten Einfang eines Protons.

Tabelle 1 : Der CNO-Zyklus in der Sonne (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weizsäcker-Zyklus>)

	Prozess	Energie	Teilchenreaktion	Lebensdauer
$\begin{matrix} \rightarrow \\ \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \end{matrix}$	${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	+ 1.95 MeV	p-Einfang	$1.3 \cdot 10^7$ Jahre
	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	+ 1.37 MeV	$\beta^+$ -Zerfall	7 Minuten
	${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	+ 7.54 MeV	p-Einfang	$2.7 \cdot 10^6$ Jahre
	${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	+ 7.35 MeV	p-Einfang	$3.2 \cdot 10^8$ Jahre
	${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	+ 1.86 MeV	$\beta^+$ -Zerfall	82 Sekunden
	${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	+ 4.96 MeV	p-Einfang	$1.12 \cdot 10^5$ Jahre

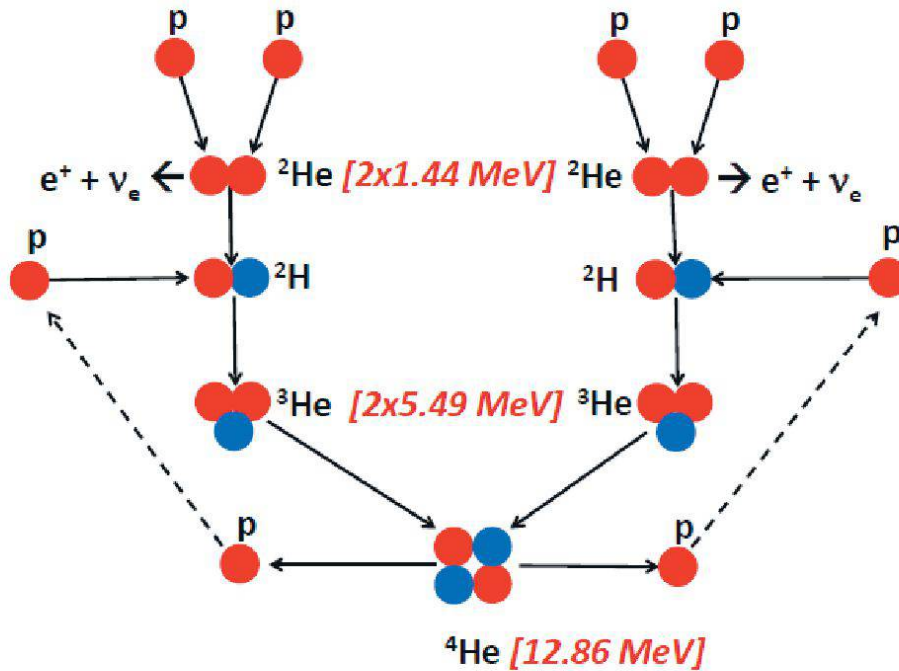
Für die Sonne endet dieser Prozess der **Nukleosynthese** beim Kohlenstoff. Bei schwereren Sternen geht er wie folgt weiter, dies allerdings nur bis zum Eisen, dann ist endgültig Schluss:



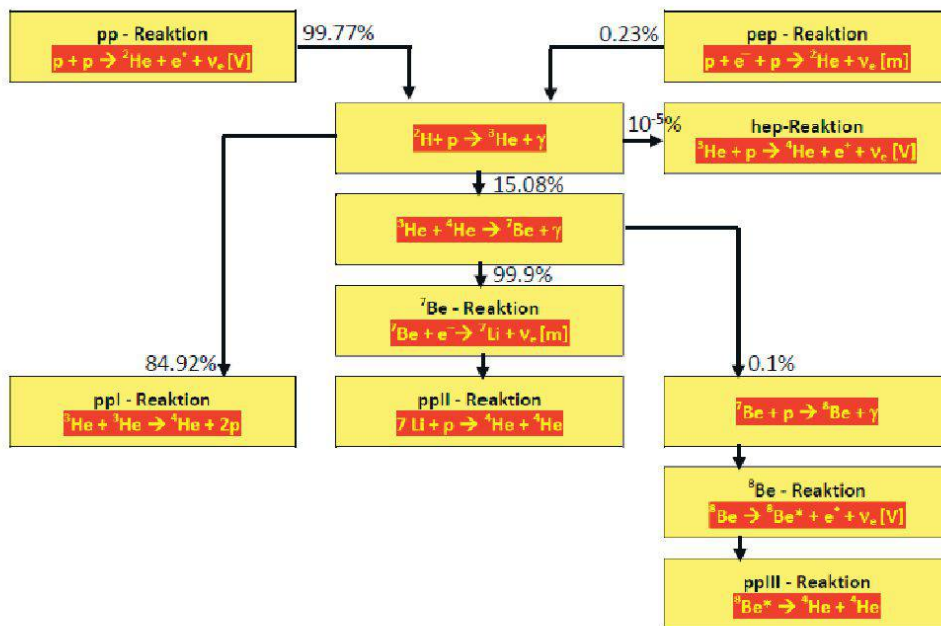
Dabei werden die einzelnen Prozessschritte immer kürzer, so bei einem Stern mit 28 Sonnenmassen:



Solche Sterne haben am Ende eine **Zwiebelstruktur**: Zuinnerst *Eisen*, dann *Silizium*, dann *Kohlenstoff* und *Sauerstoff*, dann *Helium* und aussen *Wasserstoff* und *Helium*. Die schwereren Elemente, jenseits von Eisen, entstehen erst bei der Explosion einer Supernova durch einfachen (*s-Prozess für slow*) oder mehrfachen (*r-Prozess für rapid*) Neutroneneinfang. Diese zweite Phase der **Nukleosynthese** ist endotherm, sie braucht Energie im Gegensatz zum obigen primären Prozess, der in den Sternen abläuft und exotherm ist. Zudem werden hierfür auch Neutronen benötigt. Diese entstehen ebenfalls in grosser Zahl bei der Explosion der **Supernova**. Der Prozess der Elementsynthese wandern somit auf der Nuklidkarte, mit der Neutronenzahl auf der X-Achse und der Protonenzahl auf der Y-Achse – wie auf einer Treppe – von der Kartenmitte nach rechts oben in Richtung der schweren und superschweren Elemente. Das Verhältnis Neutronen zu Protonen steigt dabei und das **«Tal der Stabilität»** entfernt sich immer mehr von Diagonalen mit  $N=Z$  Richtung Osten. Uran hat beispielsweise bereits 40 % mehr Neutronen als Protonen. Von den instabilen Elementen über dem Blei, überlebten bis heute auf der Erde jedoch nur die Uran- und Thorium-Isotope.



**Gesamt-Energiebilanz der pp-Reaktion:**  
 $4p \rightarrow 2e^+ + 2\nu_e + {}^4\text{He} + 26.35 \text{ MeV}$



[m] monoenergetische Neutrinos; [V] Energieverteilung der Neutrinos von 0 bis  $E_{\text{max}}$

**Abbildung 1:** Oben: Bei *pp-Kette* entsteht aus 4 Protonen (Wasserstoffkernen) ein Helium-Kern und rund 26 MeV werden freigesetzt. **Rot**=Protonen; **blau**=Neutronen. Unten: Alle in der Sonne ablaufenden Fusions-Prozesse, sowie die dabei freigesetzten Neutrinos: [m] = monoenergetisch, [V] = Energieverteilung bei der Emission von zwei Teilchen.

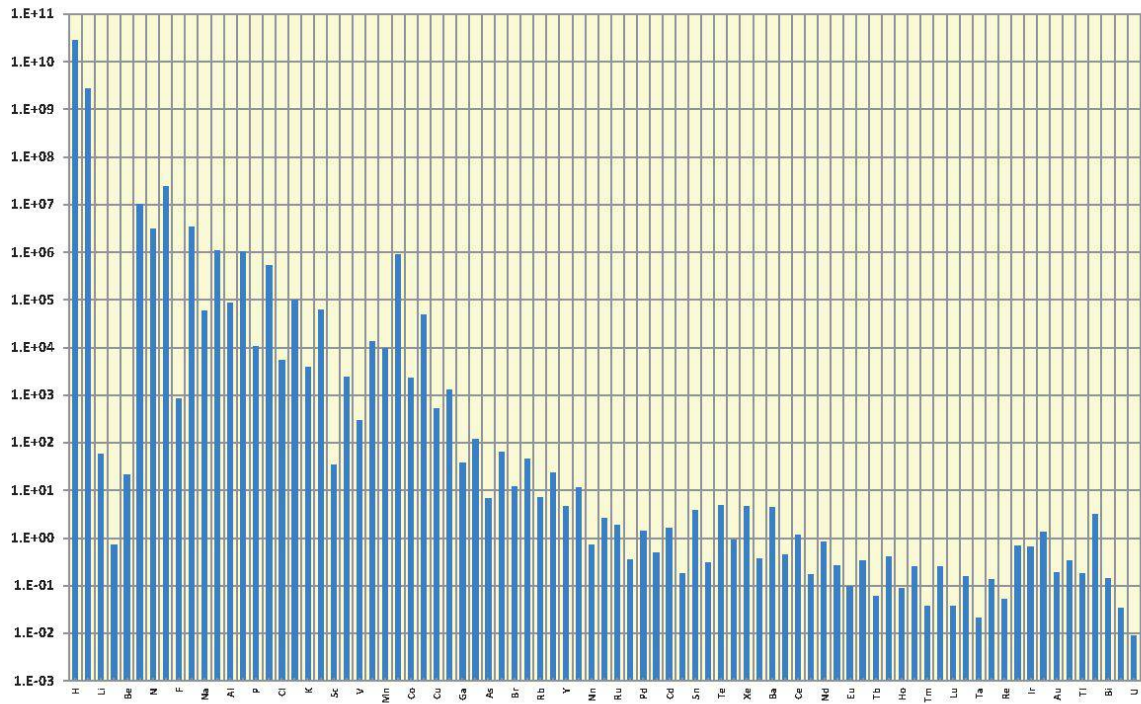
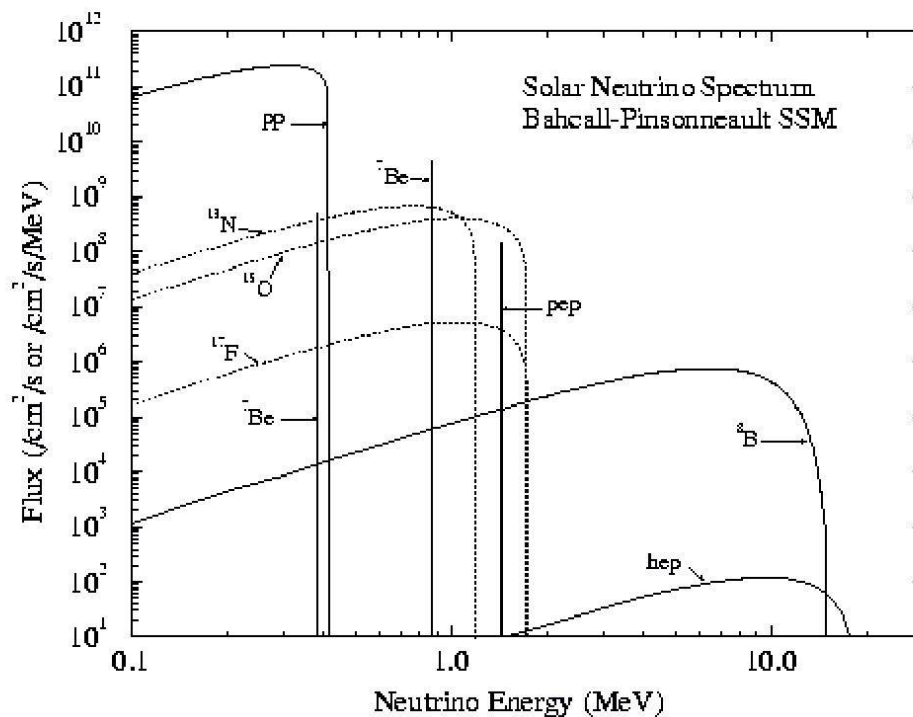
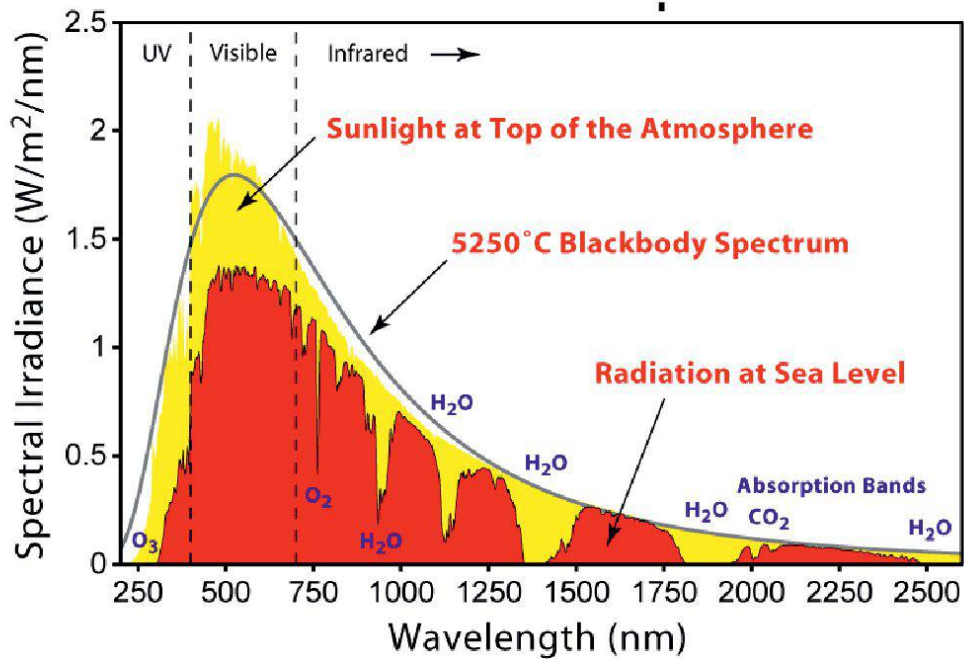


Abb. 2: Häufigkeit der Elemente in unserem Sonnensystem, normalisiert auf Silizium in Funktion der Ladungszahl Z. Datenquelle [3]



**Abbildung 3:** Oben: Sonnenspektrum (Quelle: <http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2013/06/16/das-marchen-vom-sonnenspektrum-2/>): Die gelbe Verteilung zeigt das Emissionsspektrum, die Kurve das Spektrum eines Schwarzkörpers mit rund 5500 K und die rote Verteilung was davon auf der Erdoberfläche ankommt, nachdem die Atmosphäre einen Teil davon absorbiert hat. Deutlich erkennbar sind die Absorptionsbanden im IR-Bereich durch das wichtigste Treibhausgas den Wasserdampf. Unten: Fluss [ $Teilchen/cm^2/s/MeV$ ] und Spektrum der verschiedenen Neutrinos die von der Sonne auf der Erde ankommen, entsprechend den in der Abb. 1 unten beschriebenen Prozessen (Quelle: <http://cupp oulu.fi/neutrino/nd-soll.html>).



### 3. Sonnenwind, Sonnenaktivität und von der Sonne ausgesandten Teilchen (Abb. 1 unten)

Nebst der elektromagnetischen Strahlung sendet die Sonne auch noch Teilchen aus. Einerseits die bereits erwähnten rund  $1.7 \cdot 10^{38}$  Neutrinos ( $\nu_e$ ) pro Sekunde, andererseits auch **Neutronen** (n). Diese entstehen als Sekundärteilchen bei den Sonneneruptionen. Da das freie Neutron eine Halbwertszeit von nur 886 Sekunden hat, und das Licht bereits 8 Minuten von der Sonne zur Erde braucht, gelangen nur sehr schnelle Sonnenneutronen bis zur Erde. Im Gegenteil zu den Protonen werden diese jedoch nicht vom Magnetfeld der Erde abgelenkt.

Ein weiterer von der Sonne ausgehende Teilchenstrom, bestehend hauptsächlich Protonen, aber auch etwas Elektronen und wenig Helium-Kernen, ist der **Sonnenwind**. Eine Komponente besteht aus Teilchen von 400 km/s und die andere aus solchen mit etwa 800 km/s. Die Energien der Protonen, die vor allem an den koronalen Löchern (*Sonnenflecken*) austreten, haben Energien von einem respektive drei keV. Pro Sekunde verliert die Sonne durch den Sonnenwind etwa eine Million Tonnen. Der eigentliche Sonnenwind wird jedoch nicht zur kosmischen Strahlung gerechnet, da er infolge seiner geringen Energien nicht zur Strahlendosis auf der Erde beitragen kann. Teilchen mit höheren Energien, die während der aktiven Phasen der Sonne emittiert werden und Energie zwischen  $10^8$  und  $10^9$  haben, nennt man *Solar Cosmic Ray* (SCR) oder *Solar Energetic Particles* (SEP).

Der solare Teilchenstrom wird durch den 11-jährigen **Sonnenzyklus** (*sichtbar anhand der Sonnenflecken, auch «Zurich Sunspot Number» oder «Wolf Number» genannt*) moduliert. Dieser hat auch schon – aus bisher unbekanntem Gründen – mehrmals über längere Zeit ausgesetzt, so zuletzt 1645 – 1712 beim so genannten **Maunder Minimum** (*weitere „Pausen“ waren um 1300 und im 15. Jh.*).

Die **Sonnenflecken** sind dunkler als die Sonnenoberfläche, weil hier die darunterliegende, rund  $2000^\circ\text{C}$  weniger heisse Schicht sichtbar wird. Der Sonnenwind deformiert das Magnetfeld der Erde. Dessen Wirkung als Schirm gegen die kosmische Strahlung ist daher bei erhöhter Sonnenaktivität etwa schwächer als bei ruhiger Sonne. Folglich ergibt sich eine schwache **Antikorrelation** zwischen der Sonnenaktivität und der Intensität der kosmischen Strahlung auf der Erde sowie auch bei den durch diese in der Atmosphäre erzeugten kosmogenen Radionuklide wie etwa  $^{14}\text{C}$ , Tritium, Beryllium-7 und -10 und weiteren Nukliden.

Sehr interessant ist, was man als aktive Sonne bezeichnet. Bei den als **Flares** und **koronalen Massenauswürfen** (CME) genannten Sonneneruptionen werden, zusätzlich zum normalen Sonnenwind, an den Sonnenflecken grosse Menge – bis einige Milliarden Tonnen – an Protonen, aber auch Elektronen und schwerere Kerne mit Geschwindigkeiten bis über 2000 km pro Sekunde ausgestossen, wobei grosse Energiemengen und Röntgenstrahlen freigesetzt werden. Dabei können kurzzeitig, also während Stunden oder Tagen, Teilchen mit Energie bis 10 MeV und Dichten von 100 Millionen bis 10 Milliarden pro Quadratzentimeter und Sekunde auf die Erde auftreffen. Bei minimaler Sonnenaktivität rechnet man mit einem solchen Ereignis pro Tag, bei maximaler mit fünf bis sechs. Selten – im Schnitt einmal pro Jahr – werden auch relativistische Teilchen mit bis einige GeV (*Solar Energetic Particles* SEP) emittiert. Solche Ereignisse können, wenn ihr Teilchenfluss auf die Erde gerichtet ist, zu Störungen der Telekommunikation und von GPS-Referenzdiensten führen, in Extremfällen sogar zu Ausfällen und Schäden bei Halbleiterkomponenten elektronischer Geräte.

### 4. Aufbau der Sonne (Abb. 4)

Die Sonne ist ein grosser Ball aus ionisiertem Gas, also ein Plasma mit einer mittleren **Dichte** von  $1.4 \text{ g/cm}^3$ . Sie ist somit kein starrer Körper und ihre Rotationsgeschwindigkeit nicht gleichmässig: am Pol dauert eine Umdrehung etwa 35 Tage, am Äquator rund 25 Tage (*Differenzielle Rotation*). Die Feldlinien des Sonnenmagnetfeldes werden demzufolge in eine Spirale aufgewickelt. Diese **Ro-**

**tation** kann anhand der Bewegung der Sonnenflecken beobachtet werden. In der Sonne herrscht ein Gleichgewicht zwischen dem **Gas- und Strahlungsdruck** einerseits und der **Gravitation** andererseits. Dieses Gleichgewicht bleibt während der gesamten Energieproduktion durch die Wasserstofffusion erhalten.

**Tabelle 2: Die wichtigsten Parameter der Sonne (Datenquelle: [2])**

Parameter der Sonne	Grösse	Einheit
Radius $R_{\odot}$	$6.9598 \cdot 10^8 \approx 109$ Erdradien	m
Masse $M_{\odot}$	$1.989 \cdot 10^{33} \approx 300'000$ Erdmassen	g
Schwerebeschleunigung Photosphären-Obergrenze	274	$m/s^2$
Entweichgeschwindigkeit Photosphären-Obergrenze	617.7	km/s
Leuchtkraft $L_{\odot}$	$3.584 \cdot 10^{33}$ $3.584 \cdot 10^{26}$	erg Watt
Alter	$4.55 \cdot 10^9$	Jahre
Volumen	$1.412 \cdot 10^{33}$	$cm^3$
Mittlere Dichte	1.409	$g/cm^3$
Heliumhäufigkeit Y	$0.28 \pm 0.01$	Massenanteil
Temperatur im Mittelpunkt	$1.557 \cdot 10^7$	Kelvin
Druck im Mittelpunkt	$2.344 \cdot 10^{17}$ $2.334 \cdot 10^{11}$	$erg/cm^2$ Bar ( $10 N/cm^2 = 10^3$ hPa)
Tiefe der Konvektionszone	0.287 (Radius: $0.713 \pm 0.003 R_{\odot}$ )	$R_{\odot}$
Masse der Konvektionszone	$0.022 \pm 0.002$	$M_{\odot}$
Temperatur am Boden der Konvektionszone	$(2.12 \text{ bis } 2.33) \times 10^6$	Kelvin
Temperatur der Photosphäre	5780	Kelvin
Strahlungsstrom an der Oberfläche	$6.329 \cdot 10^7$	$Watt/m^2$
Energieabgabe der Sonne	$3.86 \cdot 10^{26}$	J
Solarkonstante (am Ort der Erde)	1.37	$kW/m^2$
Absolute bolometrische Helligkeit	$+4^M_{72}$	Magnitude (M)
Scheinbare visuelle Helligkeit	$-26^m_8$	Magnitude (m)
Spektraltyp (Maximum bei 500 nm)	G2V	
Druck der Photosphäre	$10^{-4}$	Bar
Temperatur der Korona	$(2 - 3) \cdot 10^6$	Kelvin
Mittlere Entfernung von der Erde (AE)	$1.4959787 \cdot 10^{11}$	m
Winkeldurchmesser bei mittlerer Entfernung	32	Bogenminuten
Winkelskala	1 Bogensekunde = $7.253 \cdot 10^7$ cm	

Beim Sonnenaufbau lassen sich verschiedene Schichten unterscheiden (s. Abb. 4):

Der innerste Bereich, der **Kern** der Sonne (bis etwa  $\frac{1}{4}$  des Radius), macht nur 1.6 % des Volumens aber 50 % der Masse aus. Dessen Temperatur beträgt rund  $15.6 \cdot 10^6$  K und die Dichte  $151 g/cm^3$ . Die Energieerzeugung geschieht hier durch das Wasserstoff-Brennen also die Kernfusion von vier Wasserstoffatomen zu einem Helium-Kern. Hierbei werden je rund 27 MeV erzeugt. Pro Sekunde wandelt die Sonne 564 Millionen Tonnen Wasserstoff in 560 Tonnen Helium um. Dieser Massenverlust von 4 Millionen Tonnen entspricht (mit  $E = mc^2$ )  $\approx 3.7 \cdot 10^{26}$  Watt. Die Energie wird als Licht und Wärme abgestrahlt, wobei, solange der Prozess dieses Wasserstoffbrennens läuft, Strahlungsdruck und Gravitation in dynamischem Gleichgewicht bleiben.

Die nächste Schicht ist die **Strahlungszone**. Sie reicht vom Kern bis etwa 71 % des Sonnenradius<sup>6</sup>. In dieser werden Photonen aus dem Kern dauernd absorbiert und wieder emittiert und brauchen (auf ihrem Zick-Zack-Kurs) rund 10 Millionen Jahre um aus der Sonne «herauszukommen». Die Neutrinos dagegen, gelangen mit Geschwindigkeiten nahe bei der Lichtgeschwindigkeit praktisch ungehindert heraus. Bis zur Erde brauchen sie dann gerade mal wenige als Zehn Minuten.

Die folgende Zone nennt man **Konvektionszone**. Sie ist 140'000 km dick, etwa 20 % des Radius<sup>6</sup> und 2 Millionen K heiss; ihre Dichte beträgt  $0.2 g/cm^3$ . Die Energie-Übertragung nach aussen er-

folgt hier hauptsächlich durch Konvektion. Diese führt zu einer Granulation der Oberflächenstruktur, die im Teleskop sichtbar ist.

Schliesslich kommt die Oberfläche, bei der man wiederum verschiedene Schichten unterscheidet. Zuerst kommt – von innen nach aussen – die **Photosphäre**. Das ist die für uns sichtbare Sonnenoberfläche, aus der die Abstrahlung der Energie in Form von Licht und Wärme erfolgt. Sie ist 300 bis 400 km (0.02 %) dick und hat eine Temperatur von  $\approx 5777$  K. Infolge der starken Magnetfelder entstehen hier grosse Turbulenzen, die ebenfalls von der Erde aus beobachtet werden können.

Die nächste Schicht ist die **Chromosphäre** mit einer Temperatur von  $\approx 10'000$  K. Sie ist weniger dicht und nur bei einer Sonnenfinsternis sichtbar, in Form von Feuerzungen, die 7000 – 10'000 km (0.8 %) aus der Sonne herausragen und bis  $T \approx 15'000$  K heiss sind.

Darüber kommt schliesslich die **Korona**. Sie ist ebenfalls nur bei einer Sonnenfinsternis, als Strahlenkranz, sichtbar und reicht ein bis zwei Sonnenradien nach aussen mit Temperaturen von etwa ein bis zwei Millionen K. Deren abgestrahlte Energie ist allerdings, trotz der höheren Temperatur, wesentlich schwächer als jene der Photosphäre da hier die Gase nun eine sehr geringe Dichte haben. Wieso die Temperatur der Korona so hoch ist, bleibt z. Z. noch ein ungeklärt.

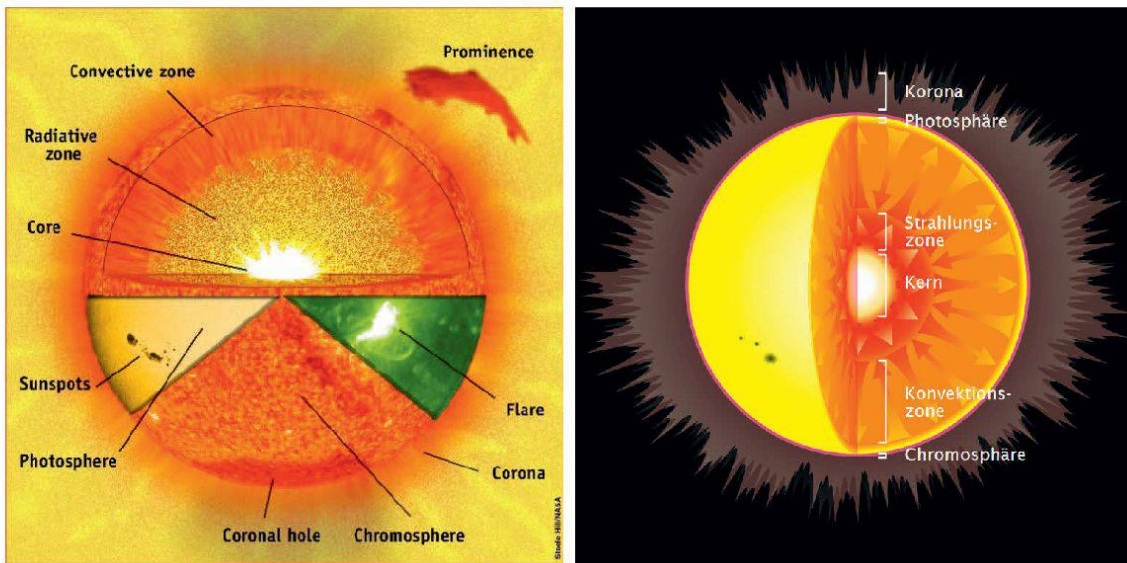
**Flares** sind gewitterartige Phänomene in der Umgebung der Sonnenflecken als Folge des Magnetfeldes für die man noch kein Modell hat. Sie brechen explosionsartig aus und emittieren Teilchen und elektromagnetische Strahlung bis in den Röntgenbereich; dauern wenige Minuten und haben Temperaturen bis  $5 \cdot 10^9$  K. Sie könnten die Radiokommunikation auf der Erde stören und lösen via Sonnenwind die Nordlichter (*Aurora borealis* am Nordpol oder *Aurora australis* am Südpol) aus.

**Fackeln** und **Filamente** sind helle Gebiete in Form von Schleifen und Wirbel, die bis zu 100'000 km in den Raum hinausreichen. Sie sind bei Sonnenfinsternissen beobachtbar als Protuberanzen. Deren Dauer beträgt wenige Stunden bis Wochen. Diese Materieströme auf der Sonne sind als matt leuchtende Bögen sichtbar sowie als dunkle, fadenförmige Strukturen (*Filamente*), die weit ins All hinausragen.

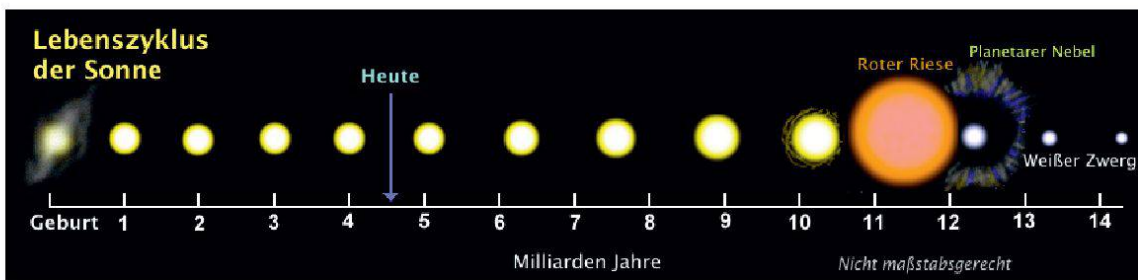
## 5. Die veränderliche Sonne – ihr Magnetfeld

Auf der Sonnenoberfläche erkennt man dunkle Flecken, die so genannten **Sonnenflecken**. Hier ist die unter der Korona liegende, kühlere Schicht sichtbar. Die Anzahl Sonnenflecken variiert gemäss dem 11-jährigen Sonnenzyklus; manchmal gibt es aber auch eine längere Pause während der keine Sonnenflecken auftreten, wie z.B. im Maunder-Minimum von 1645 bis 1715 (EDWARD WALTER MAUNDER; 1851-1928). Dieses fällt mit der so genannten «Kleinen Eiszeit» zusammen; ob ein kausaler Zusammenhang besteht, lässt sich z.Z. nicht bestätigen. Es gab früher ähnliche Phasen, während der der Sonnenzyklus aussetzte. Im Sonnenminimum sind oft keine Flecken zu sehen, im Maximum Hunderte. Diese bleiben teilweise Tage bis Monate bestehen. Sie sind für die schnelle Komponente des Sonnenwindes verantwortlich. Deren Ursache sind die an diesen Stellen (*koronale Löcher*) aus dem Sonneninnern durch die Korona austretenden starken Magnetfelder die in riesen Schlaufen (*Loops*) auch mit geladenen Teilchen und Plasmabögen an einer andern Stelle wieder in die Sonne eintreten. Deren Temperatur kann bis mehrer  $10^6$  Kelvin betragen. Die Sonnenaktivität hat via Sonnenwind einen Einfluss auf die Ionosphäre und kann den Funkverkehr beeinträchtigen. Deren Einfluss auf das Klima ist immer noch Gegenstand der Diskussion.

Das Magnetfeld der Sonne entsteht durch Strömungen heisser, geladener Teilchen im Sonneninnern. Dabei entstehen Ströme im Bereich von  $10^{12}$  Ampere. Sie erzeugen starke Magnetfelder, die infolge der differentiellen Rotation der Sonne spiralförmig aufgewickelt werden.



**Abbildung 4:** Der Aufbau der Sonne in zwei verschiedenen Darstellungen aus dem Internet  
 Quelle links: <http://www.solcomhouse.com/thesun.htm>  
 und rechts: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Solar\\_internal\\_structure-de.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Solar_internal_structure-de.svg)



**Abbildung 5:** Lebenszyklus der Sonne  
 Quelle: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Sun\\_Life\\_DE.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Sun_Life_DE.png)

## 6. Entwicklungsphasen der Sterne: Entstehung und Wasserstoffbrennen (Abb. 5)

Die Entstehung eines Sterns ist ein langer Prozess der mehrere Phasen durchläuft. Deren erste ist die Verdichtung. Da die Materiedichte im Universum sehr klein ist und nur wenige Atome pro  $\text{cm}^3$  beträgt, genügt hierzu die Gravitation allein nicht. Es gibt jedoch infolge der Inhomogenität Bereiche mit höherer Dichte, die sich durch Schockwellen von Supernovae weiter verdichten. Diese Ansammlungen kollabieren in rotierenden Scheiben, aus denen Protosterne und Planetensystem entstehen können. Nach etwa  $10^5$  Jahren hat sich an diesen Stellen die Materie bis auf  $10^{10}$  bis  $10^{12}$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$  aufkonzentriert. Unterhalb dieser Dichte kann die dabei erzeugte Wärme noch abgeführt werden, darüber jedoch nicht mehr: Wasserstoffmoleküle zerfallen (*ionisieren*) in atomares Wasserstoff. Bis die Fusion aus einem Protostern in Gang kommt, muss jedoch die Temperatur weiter, bis auf  $10^6$  K steigen. Jetzt kann der Fusionsprozess zünden und es werden (*wie bei der Wasserstoffbombe*) je vier Wasserstoffkerne (*Protonen*) zu einem Heliumkern verschmolzen. Während dieser Phase des Wasserstoffbrennens besteht ein Gleichgewicht zwischen einerseits Gas- und Strahlungsdruck durch die bei der Fusion erzeugte Energie und der Eigengravitation andererseits. Dieser Zustand bleibt, je nach Größe des Sterns, während  $2 \cdot 10^6$  bis  $2 \cdot 10^{10}$  Jahren erhalten, wobei diese Phase umso länger dauert, je kleiner die Masse eines Stern ist: Bei unserer Sonne, wie bereits ausgeführt,  $\approx 11$  Milliarden Jahre. Mit Beginn der Fusion platziert sich der Stern, entsprechend sei-

ner Grösse und Farbe (*sprich Temperatur*), auf der Linie der Hauptsequenz im Hertzsprung-Russell-Diagramm (s. Seite X und Abb. 6) und bleibt dort, solange bis der Wasserstoffvorrat aufgebraucht ist. Am Ende wird nicht mehr genügend Energie erzeugt um das bisher herrschende Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gasdruck aufrecht zu erhalten und der Stern kollabiert.

## 7. Endphase Sterne (Tab. 4 und 5)

Jetzt erhitzt sich das Sternenninnere erneut und erreicht Temperaturen von über 100 Millionen Kelvin: Es entsteht ein **Roter Riese**. Dieser dehnt sich dabei soweit aus, das – bei unserer Sonne – ihr Radius bis zur Erde reicht, was dann auch deren Ende bedeutet. Nun startet ein erneuter Kernprozess, bei dem das Helium zu Kohlenstoff und dieser später zu noch schwereren Elementen verbrannt wird (*Heliumflash*). Wie weit dieser und die folgenden Prozess geht, hängt von der Grösse des Sterns ab (s. Tabelle 4 und 5). Beim Eisen ist jedoch endgültig Schluss, da ab dann der Fusionsprozess nicht mehr exotherm, sondern endotherm und Energie benötigt. Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon erreicht nämlich beim Eisen ein Maximum mit 8.8 MeV und nimmt gegen schwerere Elemente wieder ab. Der Stern bläht sich nun immer weiter auf und erhöht seine Leuchtkraft um etwa das 1'000– bis 10'000–fache, bis er zum Roten Überriesen wird (Abb. 5). Die Dauer der einzelnen Fusionsphasen sind umso kürzer, je höher die Ordnung der erzeugten Elemente ist: Für einen Stern von 25 Sonnenmassen dauert die Wasserstoffphase 7 Millionen Jahre, die Helium-Phase 0.5 Millionen Jahre, die Kohlenstoff-Phase 600 Jahre, die Neon-Phase 1 Jahr, die Sauerstoff-Phase ein halbes Jahr und die Silizium-Phase, bei der Eisen entsteht, noch eine Tag.

Was nun weitergeschieht, hängt von der Grösse des Sterns ab. Massive Sterne können zu einer Supernova werden. Das ist ein rasches und helles Aufleuchten eines Sterns am Ende seines Lebens, bei der er durch eine riesige Explosion zerstört wird. Kleinere Sterne, wie unsere Sonne, enden als weisser Zwerg, der sich dann über Dutzende von Milliarden Jahren zu einem braunen und schliesslich einem schwarzen Zwerg abkühlt. Supernovae können auf zwei Arten entstehen: Einerseits aus grossen Sternen mit Anfangsmasse von mehr als etwa acht Sonnenmassen (**Typs 1**). Aus diesen kann dann auch ein sehr kompaktes Objekt entstehen, wie ein Pulsar oder ein Schwarzes Loch. Sterne mit kleinerer Masse können im Station eines weissen Zwerges Material (*falls sie Teil eines Doppelsternsystems sind*) von ihrem kleineren Partner ansaugen (*akkretieren*), bis sie genügend Masse für eine Supernova haben (**Typs 2**). Supernovae werden mit ihrem Entdeckungsjahr und einem fortlaufenden Buchstaben gekennzeichnet: z.B. 1987A. Hat der Stern weniger als 1.4 Sonnenmassen, stösst er seine äussere Hülle ab und es kommt nicht zu einer Supernova. Diesen Wert nennt man die Chandrasekhar-Grenze für die obere Grenze der Masse eines Weissen Zwerges:

$$M_{\text{krit}} = 1.45727 (2/\eta)^2 M_{\odot} \quad (19)$$

mit  $\eta$  Verhältnis der Nukleonen zu Elektronen (z.B.:  $^{16}\text{O}$ :  $\eta=16/8=2$  oder  $^{12}\text{C}$ :  $\eta=12/6=2$ ). Nachdem die äussere Hülle weg ist, bleibt ein Kern übrig von der Grösse der Erde, der vor allem schwere Elemente wie Kohlenstoff und Eisen, aber nur wenig Wasserstoff enthält. Es findet auch kein Kernprozess mehr statt, da die thermische Energie hoch ist, bleibt die Oberflächentemperatur von 10 Milliarden Kelvin bis zu 10 Milliarden Jahre erhalten. Da dieser Restkern als weisser Zwerg jedoch sehr klein ist, beträgt seine absolute Helligkeit nur zwischen **8m** und **16m**. Er kühlt dann langsam ab und wird zu einem braunen, später zu einem schwarzen Zwerg. Diese Phase kann sehr lange dauern (bis auf 5 K etwa  $10^{15}$  Jahre), weshalb bis heute noch keine schwarze Zwerge beobachtet wurden.

Wie bereits erwähnt, ist die Explosion als Supernovae vom Typ 1 bei weissen Zwergsternen möglich, wenn er einen Doppelstern als Begleiter hat und der massenreichere der beiden Sterne Materie des leichteren ansaugt. Ab einer gewissen Masse entzündet sich der Kohlenstoff unter extrem entarteten Bedingungen, wobei grosse Energiemengen erzeugt werden und der explodierende Stern dabei seinen Begleitstern wegschleudert.

Da der Mechanismus der Explosion einer Supernova pro Klasse immer etwa derselbe ist, ergibt sich immer etwa dieselbe Leuchtkraft. Man verwendet solche Ereignisse daher in der Astronomie als «Standardkerze» für die Entfernungsmessung bzw. für die Bestimmung der Rotverschiebung. Gemäss dem Hubble-Gesetz ist die Fluchtgeschwindigkeit eines Objektes im Abstand  $D$ , nämlich:

$$v_F = H_0 D \quad (20)$$

Je weiter ein Objekt von uns entfernt ist, umso höher ist also seine Fluchtgeschwindigkeit.  $H_0$  ist die Hubble-Konstante (EDWIN POWELL HUBBLE; 1898-1952) mit:

$$H_0 \approx 23 \text{ km/s pro } 10^6 \text{ Lichtjahre} \approx 73.4 \text{ km/s pro Mpc} \approx 2.43 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} \quad (21)$$

$1/H_0$  ist dann eine Zeit und entspricht mit 13.7 Milliarden Jahren dem Alter des Universums. Die Beziehung zwischen der Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0) / \lambda_0 = \Delta\lambda / \lambda \quad (22)$$

und Entfernung einer Galaxie von der Erde ist, mit:

$$v_F = H_0 D \quad (22)$$

beziehungsweise:

$$zc = H_0 D \quad \text{und:} \quad z = H_0 D/c \quad (23)$$

Es gibt noch eine weitere Klasse von Supernovae: die «*Super lumious Supernova*», deren Leuchtkraft noch um zwei Grössenordnungen höher ist als bei den üblichen Supernovae. Solche sind aber nur bei Sternen mit mehr als 140 Sonnenmassen möglich.

Bei Sternmassen zwischen dem 1.3- und dem 3-fachen Sonnenmassen entsteht aus dem Restkern nach der Supernova-Explosion ein **Neutronenstern**. Seine Grösse beträgt nur zwischen 20 bis 24 km und seine Entweichgeschwindigkeit ist wegen der grossen Dichte und Masse sehr hoch. Bei diesem Kollaps ist der Druck so hoch, dass die Kerne sich berühren und die Elektronen in die Protonen hineingedrückt werden und ein sehr dichtes Neutronengas bilden. Der Mantel eines Neutronensterns bildet eine mehrere hundert Meter dicke Eisenkruste, rund 6 Grössenordnungen härter als Stahl ist. Dessen Dichte liegt zwischen  $10^{14}$  und  $2.5 \cdot 10^{15} \text{ g/cm}^3$  (Zum Vergleich die Dichte des Atomkerns beträgt  $\approx 2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ). Anfänglich beträgt die Temperatur im Kern über  $10^{11}$  Kelvin und kühlt sich während der nächsten Million Jahren auf  $10^7$  Kelvin ab. Die Leuchtkraft ist jedoch kleiner als bei einem Weissen Zwerg.

Beträgt die Masse des Restkerns nach der Explosion der Supernovae mehr als 3.2 Sonnenmassen entsteht aus dem Restkern ein **Schwarzes Loch** (Tab. 3), das wohl faszinierende Objekt der Astronomie. Dabei fällt der Kern immer weiter in sich zusammen unter einen Wert den man den Schwarzschild-Radius nennt  $r_s$ . Dieser lässt sich aus der Fluchtgeschwindigkeit  $v_F$  herleiten. Mit  $E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$ , erhält man:

$$mv^2/2 = GMm/r \quad (24)$$

und daraus:

$$v_F = (2GM/r)^{1/2} \quad (25)$$

Diese Geschwindigkeit ist nötig, damit ein Objekt sich aus der Gravitation des betreffenden Sterns befreien kann. Setzt man  $v_F = c$  (als für Licht) erhält man für den Schwarzschildradius  $r_s$ :

$$r_s = 2GM/c^2 \quad (26)$$

Bei Neutronensternen beträgt  $v_F$  bereits 40 % von  $c$ . Bei einem schwarzen Loch, wo diese grösser als  $c$  wird können somit weder massebehaftete Teilchen noch Licht ( $v_F = c$ ) entweichen, weshalb das schwarze Loch für uns unsichtbar (schwarz) ist. Man kann es nur aus der Ablenkung des Lichtes

ferner Sterne oder Bewegung benachbarter Objekte erahnen bzw. dessen Masse bestimmen. Die Sonne als schwarzes Loch hatte einen Radius von 3 km und eine Dichte von  $\approx 10^{16}$  g/cm<sup>3</sup>, die Erde wäre kleiner als eine Haselnuss (Tab. 3).

Den Schwarzschildradius nennt man auch Ereignishorizont, da alle Ereignisse, die innerhalb geschehen, können von der Aussenwelt (*also dem gesamten übrigen Universum*) nicht gesehen werden und umgekehrt: was aussen passiert ist innen nicht sichtbar. Mit Materie ist es ähnlich, denn auch sie fällt unweigerlich auf das Loch zu. Der kollabierte Stern fällt aber weiter zusammen und endet möglicherweise als eine Singularität. Das ist ein Körper mit unendlich grosser Dichte auf unendlich kleinem Raum. Am Ende haben Schwarze Löcher höchstens noch drei Eigenschaften: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung. Jede weitere Materie oder Energie, die ins *Schwarze Loch* fällt, verliert unweigerlich ihre Informationen und Eigenschaften und nimmt nur diese drei Werte an. Die Naturgesetze sind in Schwarzen Löchern nicht mehr gültig. So wird zum Beispiel die Gravitation in Fliehkraft umgewandelt. Laut Theorie könnten Schwarze Löcher auch Wurmlöcher bilden. Diese verbinden zwei Stellen des Raums oder der Zeit. Es sind auch Verbindungen zu anderen Universen denkbar. Nachgewiesen wurden Wurmlöcher jedoch bisher noch nicht.

Der Nobelpreisträger SUBRAHMANYAN CHANDRASEKHAR (1910-1995) gibt in seiner *Nobel-Lecture* vom 8. Dezember 1983 folgende, rein mathematische, Definition des schwarzen Loches:

« A black hole partitions the three-dimensional space into two regions: an inner region which is bounded by a smooth two-dimensional surface called the event horizon; and an outer region, external to the event horizon, which is asymptotically flat; and it is required (as a part of the definition) that no point in the inner region can communicate with any point of the outer region. This incommunicability is guaranteed by the impossibility of any light signal, originating in the inner region, crossing the event horizon. The requirement of asymptotic flatness of the outer region is equivalent to the requirement that the black hole is isolated in space and that far from the event horizon the space-time approaches the customary space-time of terrestrial physics.»

**Tabelle 3:** Klassierung von schwarzen Löchern; SMBH (Super Massive Black Hole) finden sich vor allem im Zentrum von Galaxien; sie können dabei bis einen Zehntel der Gesamtmasse der Galaxie ausmachen.

Klassierung von schwarzen Löchern	Masse	Grösse (Schwarzschildradius $r_s$ )
Supermassereiches Schwarzes Loch (= SMBH)	$\approx 10^5 - 10^{10} M_{\odot}$ $\approx 2 \cdot 10^{35} - 2 \cdot 10^{40}$ kg	$\approx 0.001 - 400$ AE $\approx 1.5 \cdot 10^8$ m – $6 \cdot 10^{13}$ m
Mittelschweres Schwarzes Loch	$\approx 1000 M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{34}$ kg	$\approx 10^3$ km $\approx 10^6$ m
Stellares Schwarzes Loch	$\approx 10 M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{31}$ kg	$\approx 30$ km $\approx 3 \cdot 10^4$ m
Primordiales Schwarzes Loch	bis zu $\approx M_{\text{Mond}} \approx 8 \cdot 10^{22}$ kg	bis zu $\approx 0.1$ mm $= 10^{-4}$ m

Die **Gravitations-Rotverschiebung** für Strahlung aus dem Zentrum des Schwarzen Loches beträgt dann:

$$v/v' = \lambda'/\lambda = (1 - v_F^2/c^2)^{-1/2} \quad (27)$$

und damit (da  $F_{\text{Gravitation}} = GmM/r^2$ , mit der Schwerebeschleunigung im Abstand  $r$ :  $g = GM/r^2$ ):

$$\lambda'/\lambda = (1 - 2GM / (c^2 r))^{-1/2} \quad (28)$$

Wenn  $r \rightarrow r_s$  dann folgt  $\lambda' \rightarrow \infty$ ; d.h. Sterne mit  $r < r_s$  können kein Licht mehr emittieren oder reflektieren, sind daher für den Beobachter schwarz.

**Tabelle 4: Einige Eigenschaften der Sterne (Datenquelle: z.T. Internet + Ergänzungen)**

Masse des Sterns [in $M_{\odot}$ ]	30 $M_{\odot}$	10 $M_{\odot}$	3 $M_{\odot}$	1 $M_{\odot}$	0.3 $M_{\odot}$
Leuchtkraft während der Hauptsequenz	10'000 $L_{\odot}$	1'000 $L_{\odot}$	100 $L_{\odot}$	1 $L_{\odot}$	0.004 $L_{\odot}$
Dauer der Hauptsequenz [ $10^9$ Jahre]	0.06	0.10	0.30	10	800
Kernreaktion endet bei:	Eisen	Silizium	Sauerstoff	Kohlenstoff	Helium
Endprozess:	Supernova	Supernova	planetarischer Nebel	Sternenwind	Sternenwind
Ausgeworfene Masse [ $M_{\odot}$ ]	24 $M_{\odot}$	8.5 $M_{\odot}$	2.2 $M_{\odot}$	0.3 $M_{\odot}$	0.01 $M_{\odot}$
Art des Restkerns	Schwarzes Loch	Neutronen-Stern	Weisser Zwerg	Weisser Zwerg	Weisser Zwerg
Masse des Restkerns [ $M_{\odot}$ ]	6 $M_{\odot}$ ( $\approx 20\%$ )	1.5 $M_{\odot}$ ( $\approx 15\%$ )	0.8 $M_{\odot}$ ( $\approx 27\%$ )	0.7 $M_{\odot}$ ( $\approx 70\%$ )	0.3 $M_{\odot}$ ( $\approx 100\%$ )
Dichte [ $g/cm^3$ ]	$3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^7$	$10^7$	$10^5$
Radius [m]	6192.21	17861.44	$2.67 \cdot 10^6$	$3.22 \cdot 10^6$	$5.22 \cdot 10^6$
Gravitation [in $m \cdot s^{-2}$ ]	$5.19 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	$1.49 \cdot 10^7$	$8.99 \cdot 10^6$	$1.46 \cdot 10^6$

**Tabelle 5: Entwicklungs-Stadien der Sonne (Datenquelle: z.T. Internet + Ergänzungen)**

Phase	Dauer [in $10^6$ Jahren]	Leuchtkraft [in $L_{\odot}$ ]	Radius [in $R_{\odot}$ ]
Hauptreihenstern	11'000	0.7 ... 2.2	0.9 ... 1.6
Übergangsphase	700	2.3	1.6 ... 2.3
Roter Riese	600	2.3 ... 2300	2.3 ... 166
Beginn des He-Brennens	110	44	$\approx 10$
He-Schalenbrennen	20	44 ... 2000	10 ... 130
Instabile Phase	0.4	500 ... 5000	50 ... 200
Übergang zu Weissem Zwerg mit planetarischem Nebel	0.1	3500 ... 0.1	100 ... 0.08
Brauner bzw. Schwarzer Zwerg	$10^{15}$ bis $10^{25}$ Jahre	erloschen	?

## 8. Das Hertzsprung-Russel-Diagramm - Klassierung der Sterne Helligkeit (Abb. 6)

Das HRD, wie dieses Diagramm kurz genannt wird, wurde 1913 von HENRY NORRIS RUSSELL (1877-1957) entwickelt und baut auf den Forschungen von EJNAR HERTZSPRUNG (1873-1967) auf. Es erlaubt die Entwicklungsgeschichte von Sternen darzustellen. Auf der X-Achse ist deren Temperatur, bzw. Farbe oder die Spektralklasse, in umgekehrter Richtung aufgetragen: Heisse, blaue Sterne sind links und kältere, rote sind Sterne rechts im Diagramm. Auf der Y-Achse ist die Helligkeit in einer logarithmischen Skala aufgetragen, meist normiert auf die Helligkeit der Sonne.

Die Linie, die das Diagramm von links oben nach rechts unten durchschneidet, nennt man die Hauptsequenz, das ist die Zeitperiode, während der ein Stern Wasserstoff zu Helium verbrennt. Ein neu entstandener Stern platziert sich entsprechend seiner Grösse bzw. Temperatur auf dieser Hauptsequenz und bleibt dort solange, bis er seinen Wasserstoffvorrat weitgehend verbraucht hat. Die **Sonne** ist mit ihrer relativen Leuchtstärke von 1 und einer Temperatur knapp über 5000 Kelvin eingezeichnet. Nach dem Ende des Wasserstoffbrennens folgt sie der orangen Linie: wird zu einem **Roten Riesen** (*Wasserstoffbrennen in einer Schale um den Kern*), dann einem **gelben Riesen** (*Heliumbrennen im Kern*) und schliesslich zu einem **Roten Überriesen**, dabei stösst sie einen Teil der Masse als planetarischer Nebel ab. Dann steigt die Temperatur, es werden weiter Gase abgestossen, der Kern schrumpft und beginnt sich dann von einem Weissen zu einem braunen Zwerg abzukühlen, da er keine Energie mehr erzeugt. Nach sehr langer Zeit und einer sehr langen Abkühlphase von  $10^{15}$  bis  $10^{25}$  Jahren wird aus dem braunen dann ein Schwarzen Zwerg, das Endstadium des Sterns.



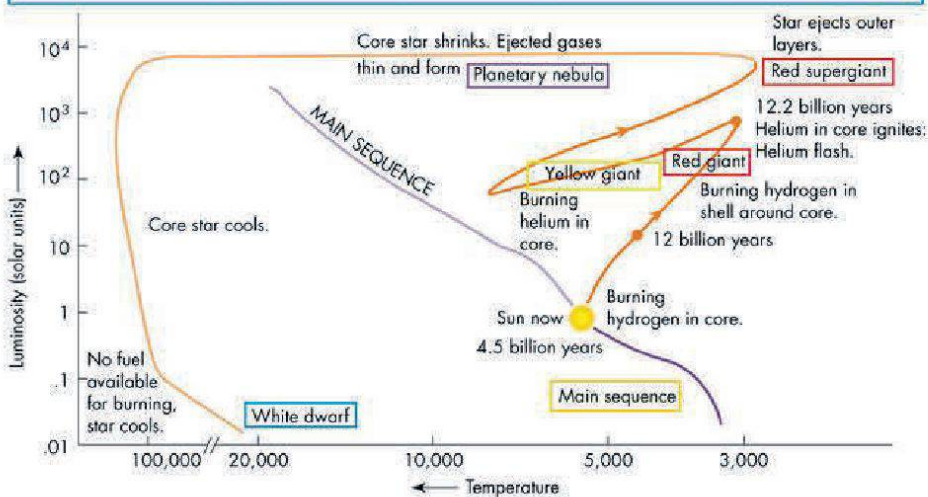
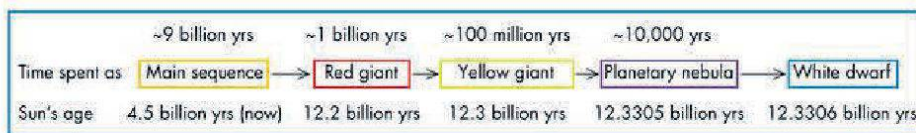
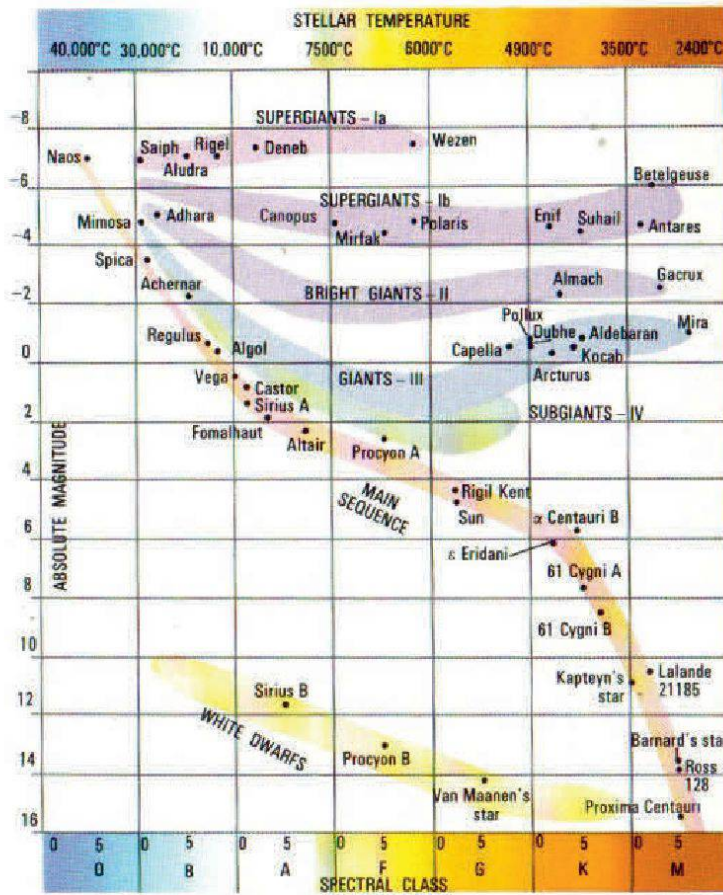


Abbildung 6: Zwei Darstellungen des Hertzsprung-Russell Diagramms mit der Position der Sonne auf der Hauptsequenz; auf dem unteren ist der Parcours der Sonne nach dem Ende der Hauptsequenz bis zum Weissen Zwerg eingetragen. (Quelle: Internet)

Unsere Sonne gehört zur Klasse Sonne: **G2V**, also der Hauptklasse «**G**» (Gelb) bezüglich Temperatur, der Unterklasse «**2**» und Leuchtkraftklasse «**V**». Ihre scheinbare bzw. absolute Helligkeit betragen  $-26^m74$  (auch 26.74mag) bzw.  $+4^M83$ .

**Tabelle 6: Leuchtkraftklassen und Sterntypen (Die Klassierung der Sonne ist G2V)**

Leuchtkraftklasse	Sterntyp	Oberflächentemperatur für verschiedene Sternkategorien		
I	Überriese	Klasse	Temperatur	Beispiel
Ia-0, Ia, IaB, Ib	Überriesen abnehmender Leuchtkraft	O ( <i>Blau</i> )	33'000 K oder mehr	Zeta Ophiuchi
II	heller Riese	B	10'500 – 30'000 K	Rigel
III	«normaler» Riese	A	7'500 – 10'000 K	Altair
IV	Unterriese	F	6'000 – 7'200 K	Procyon A
V	Zwerg (Hauptreihenstern) ( <b>Sonne</b> )	G ( <i>Gelb</i> )	5'500 – 6'000 K	<b>Sonne</b>
VI	Unterswerg	K	4'000 – 5'250 K	Epsilon Indi
VII	Weisser Zwerg	M ( <i>Rot</i> )	2'600 – 3'850 K	Proxima Centauri

Diese Klasseneinteilung und insbesondere die gewählten Buchstaben haben historische Gründe. Um sich diese leicht zu merken, gibt es einige Merksätze (Beispiele):

**Tabelle 7: Merksätze für die Sternklassen**

« <b>O</b> <b>B</b> e <b>A</b> <b>F</b> ine <b>G</b> irl <b>K</b> iss <b>M</b> e ( <b>R</b> ight <b>S</b> mack <b>N</b> ow) »	O B A F G K M (R S N)
« <b>O</b> <b>B</b> e <b>A</b> <b>F</b> ine <b>G</b> irl <b>K</b> iss <b>M</b> y <b>L</b> ips <b>T</b> onight »	O B A F G K M L T
« <b>O</b> pa <b>B</b> astelt <b>A</b> m <b>F</b> reitag <b>G</b> erne <b>K</b> leine <b>M</b> ännchen »	O B A F G K M
« <b>O</b> ffenbar <b>B</b> enutzen <b>A</b> stronomen <b>F</b> urchtbar <b>G</b> erne <b>K</b> omische <b>M</b> erksätze »	O B A F G K M

Als **scheinbare Helligkeit** bezeichnet man die Leuchtkraft in Watt eines Objektes am Ort des Beobachters:

$$L = 4\pi r^2 F \tag{29}$$

Dabei ist  $F$  der Lichtfluss (od. Energiefluss)  $[W/m^2]$  gemessen am Ort Beobachter und  $r$  der Abstand zwischen dem Objekt und dem Beobachter, wobei angenommen wird, die Strahlung sei isotrop. Die scheinbare Helligkeit (Magnitude) wird mit «**m**» bezeichnet. Für die Sonne beträgt sie  $-26^m74$  ( auch 26.74mag). Sterne werden nach ihrer scheinbaren Helligkeit in Helligkeitsklassen eingeteilt: **I** am hellsten, **VI** sind noch mit blossen Auge erkennbar. Die Klasseneinteilung ist logarithmisch, also auf die Empfindlichkeit des Auges abgestimmt, die auch logarithmisch ist. Diese Skala basiert auf der folgenden Definition: Ein Stern der Klasse **I** ist 100-mal heller als einer der Klasse **VI**. Der Unterschied zwischen der Klasse **n** und der Klasse **n+1** beträgt somit  $100^{1/5} = 2.512$ ; Magnitude:  $m = -2.5 \log (F/F_0)$ . (Der Einfachheit halber wurde der Wert von exakt 2.5 und nicht 2.512 gewählt). Die Grössenklassen sind dimensionslos. Je kleiner der Wert, umso heller ist das Objekt und umgekehrt. Man schreibt  $5^m$  oder 5 mag. Zwei Sterne mit Helligkeit **m** bzw. **m+1** unterscheiden sich in der Flussdichte  $F_m$  und  $F_{m+1}$ :

$$m - (m+1) = -2.5 \log (F_m / F_0) + 2.5 \log (F_{m+1} / F_0) = -2.5 \log (F_m / F_{m+1}) \tag{30}$$

$$F_m / F_{m+1} = 100^{1/5} = 2.5 \quad (\text{gerundet von } 2.512) \tag{31}$$

also:

$$m - (m+1) = 1 \tag{32}$$

Der hellste Stern hat die scheinbare Helligkeit von:

$$-1.5\text{mag} \quad (\text{auch } -1^m5) \tag{33a}$$

die Sonne:

$$-26.74\text{mag} \text{ (oder } -26^{\text{m}}74) \quad (33\text{b})$$

der Vollmond:

$$-12.5\text{mag} \quad (33\text{c})$$

das schwächste Objekt:

$$\approx 25\text{mag} \quad (33\text{d})$$

Der Unterschied in der Flusssdichte zwischen der Sonne und dem Vollmond beträgt somit:

$$-12.5\text{mag} + 26.8\text{mag} = 14.3\text{mag} \quad (34)$$

also:

$$F_S / F_M \approx 100^{(14.3/5)} = 5.25 \cdot 10^5 \quad (35)$$

Differenz in Grössenklassen	1	2	2.510	3	4	5	7.5	10	12.5	15
Intensitätsunterschied um Faktor	2.512	6.3	10	15.849	39.811	100	1000	10'000	100'000	1'000'000

Damit Helligkeit unabhängig von Wellenlänge ist, muss eine Korrektur bezüglich der Farbtemperatur gemacht werden. Man nennt sie die **bolometrische Korrektur (BC)** mit:

$$m_{\text{bol}} = m_{\text{visuell}} - \text{BC} \quad (36)$$

Als Nullpunkt der **BC** wurde die Sonnenstrahlung gewählt mit  $\text{BC}_{\odot} = 0$ .

Spektraltyp	B0	A0	F0	G0	K0	K5	M0	M5
BC [mag]	-2.69	-0.10	+0.07	+0.01	-0.12	-0.55	-1.10	-2.48

Als **Absolute Helligkeit** bezeichnet man die gemessene Helligkeit unabhängig vom Abstand Beobachter, also in einem fixen Abstand von 10 **parsec**. Ein Parsec ist die Entfernung, aus der die Astronomische Einheit, d.h. aus der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne von 149 Mio. km (genauer:  $1.495 \cdot 978 \cdot 707 \cdot 10^{11}$  m) unter einem Winkel von einer Bogensekunde ( $1'' = 1^\circ/3600$ ) gesehen wird. Ein Stern in dieser Entfernung hat einen Parallaxenwinkel zwischen zwei Beobachtungen im Abstand von einem halben Jahr von genau einer Bogensekunde. Das **parsec** ist somit eine Längeneinheit; sie entspricht etwa 3.26 Lichtjahren oder  $3.086 \cdot 10^{16}$  m. Man schreibt die Magnitude der Absoluten Helligkeit mit einem grossen «M», für die Sonne  $+4^{\text{M}}83$  oder  $+4.83\text{Mag}$ . Die Beziehung zwischen der scheinbaren (**m**) und der absoluten Helligkeit (**M**) ergibt sich folgendermassen:

$$F(r) / F(10 \text{ parsec}) = 10 (\text{parsec}/r)^2 \quad (37)$$

Daraus ergibt sich:

$$m - M = 2.5 \log [F(r) / F(10 \text{ parsec})] = 2.5 \log (10 \text{ parsec}/r)^2 \quad (38)$$

Die Rechnung ergibt also:

$$m - M = 5 \log (r/10) \quad (39)$$

Setzt man ein:

$$10 \text{ parsec} = 3.086 \cdot 10^{17} \text{ m} = 32.6 \text{ Lichtjahre} = 2.063 \cdot 10^6 \text{ AE} \quad (40)$$

Erhält man für die Sonne den Bezug zwischen scheinbarer (**m**) und absoluter (**M**) Helligkeit mit:

$$m = M + 5 \log (r [\text{parsec}] / 10 [\text{parsec}]) = 4^{\text{M}}83 - 31^{\text{m}}76 = -26^{\text{m}}74 \quad (41)$$

## 9. Die Sonne – Erde – Wechselwirkung und der Treibhauseffekt (Abb. 7)

Die Solarkonstante von  $S = 1367 \text{ W/m}^2$  ergibt die auf eine Fläche von einem  $\text{m}^2$  senkrecht zur Richtung der Sonneneinstrahlung am Ort der Erde auftreffende Energie. Die von der Erde absorbierte Energie beträgt somit:

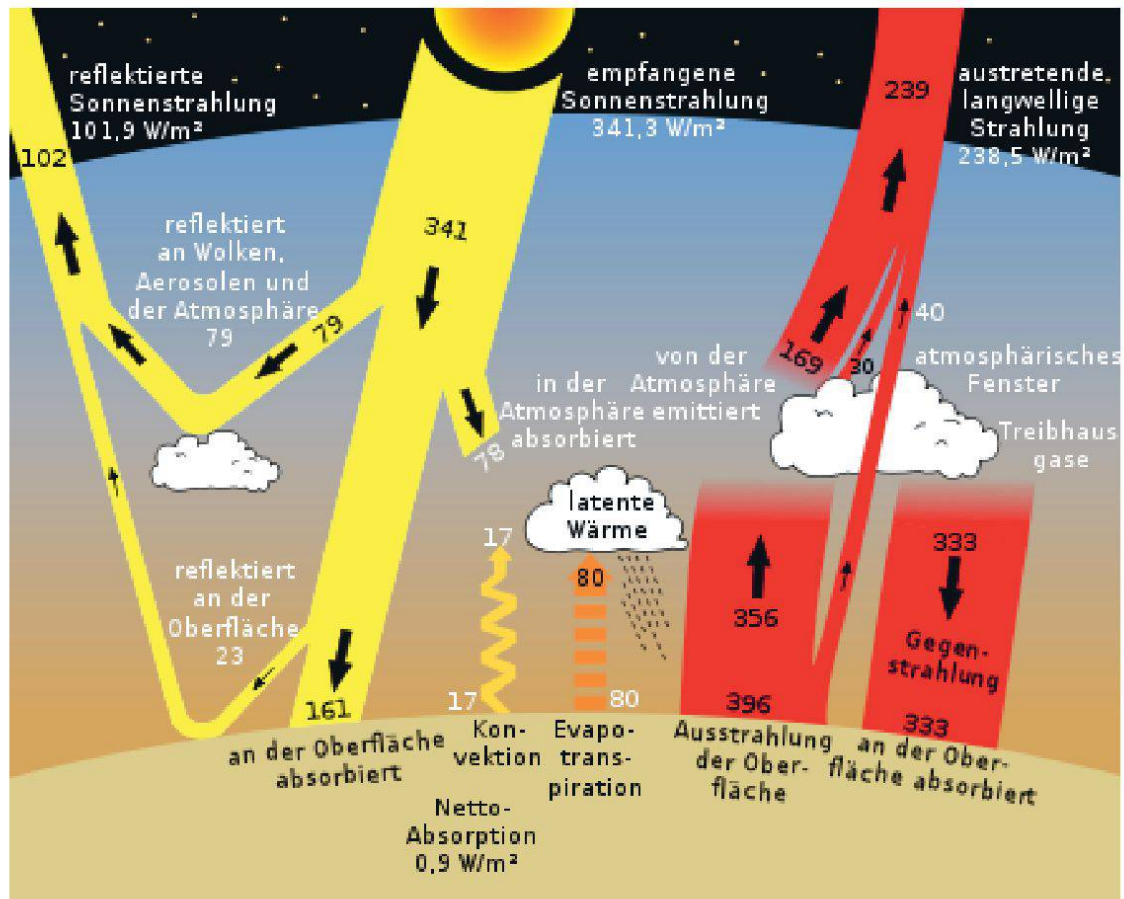


Abbildung 7: Energiebilanz der Erde und Treibhauseffekt  
(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt>)

$$P_a = (1 - r) \pi R_E^2 S \approx 1,36 \cdot 10^{17} \text{ W} \quad (42)$$

wobei  $r$  mit rund 30% der Anteil der reflektiert Strahlung und  $R_E$  der Erdradius sind. Man betrachtet hier die Erde als eine Scheibe mit Radius  $R_E$  senkrecht zur Richtung der einfallenden Sonnenstrahlung. Die Erde wiederum emittiert, entsprechend ihrer Temperatur  $T_E$ , gemäss dem Stefan-Boltzmann Strahlungsgesetz für einen schwarzen Körper, die Energie  $P_e$  im Infrarotbereich zurück in den Weltraum mit der Intensität  $I_E = e\sigma T_E^4$ :

$$P_e = 4\pi R_E^2 I_E = 4\pi R_E^2 e\sigma T_E^4 \quad (43)$$

Dabei ist: 
$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (44)$$

die Stephan-Boltzmann-Konstante und  $e \approx 0,6$  der «Wirkungsgrad» dieser Rückstrahlung, d.h. der Anteil der nicht von der Atmosphäre durch die Treibhausgase wieder absorbiert wird. Damit erhält man für die gesamte Rückstrahlung (da diese im Gleichgewicht mit der Einstrahlung sein muss):

$$P_e = P_a = 4\pi R_E^2 \epsilon \sigma T_E^4 = (1 - r) \pi R_E^2 S \approx 1.36 \cdot 10^{17} \text{ W} \quad (45)$$

Dividiert man durch die Oberfläche der Erde von  $4\pi R_E^2$  von 510 Millionen  $\text{km}^2$  erhält man:

$$(1 - r) S / 4 = \epsilon \sigma T_E^4 \approx 237 \text{ W/m}^2 \quad (46)$$

für die von der Erdoberfläche absorbierte und wieder emittierte Strahlungsleistung, die miteinander im Gleichgewicht sein müssen, damit die Temperatur der Erde konstant bleibt. Ohne reflektierte Strahlung würde man einen Wert von  $1367/4 \approx 341.3 \text{ W/m}^2$  erhalten. Vernachlässigt man die eigenen Energiequellen der Erde, kann man schreiben:

$$T_E = [(1 - r) S / (4\epsilon\sigma)]^{1/4} \approx 289 \text{ K} \approx +15^\circ\text{C} \quad (47)$$

Die eigenen Energiequellen der Erde betragen zusammen lediglich 0.02 %: Davon der radioaktive Zerfall in der Erdkruste: 0.013 %, die Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe: 0.007 % und die Gezeitenreibung: 0.002 %. Die letztere führt übrigens dazu, dass die Erdrotation mit der Zeit leicht abnimmt, ähnlich wie bei einem rotierenden rohen Ei, wo der hin- und her-schwingende Dotter Rotationsenergie absorbiert.

Mit, bzw. ohne Absorption der Erdstrahlung in der Atmosphäre durch die Treibhausgase, erhält man für die durchschnittliche Temperatur der Erdatmosphäre die folgenden Werte:

$$\text{für } \epsilon = 1 \text{ (also ohne Treibhauseffekt)} \rightarrow T_E \approx -18^\circ\text{C} \quad (48a)$$

$$\text{für } \epsilon = 0.6 \text{ (also mit Treibhauseffekt)} \rightarrow T_E \approx +15^\circ\text{C} \quad (48b)$$

Die Treibhausgase bewirken somit, dass es auf der Erde rund  $33^\circ\text{C}$  wärmer ist als ohne diesen. Da die Spektraltemperatur der Sonne  $5777 \text{ K}$  beträgt und das Maximum der Strahlung bei  $500 \text{ nm}$  im grün-gelben Bereich des sichtbaren Lichtes liegt, ist die Erdatmosphäre für diese Strahlung weitgehend transparent. Für die von der Erde in den Weltraum rückgestrahlte Infrarotstrahlung bei etwa  $10^4\text{000 nm}$  jedoch ist sie es jedoch nur noch teilweise. Für diese Absorption sind nämlich die Treibhausgase verantwortlich: Deren wichtigste Beiträge zum Treibhauseffekt sind die folgenden:

<b>Wasserdampf: 36 – 70%</b>
<b>Kohlendioxid: 9 – 26 %</b>
<b>Methan: 4 – 9 %</b>
<b>Ozon (in der Stratosphäre): 3 – 7 %</b>

Damit die Strahlung im Gleichgewicht zwischen Absorption und Rückstrahlung ist, muss die Erde also auch  $341.3 \text{ W/m}^2$  ins Weltall zurückstrahlen. Davon kommen  $90 \text{ W/m}^2$  (26 %) direkt von der Erdoberfläche (*was nicht von der Atmosphäre zurückgehalten wird*),  $150 \text{ W/m}^2$  (44 %) von der Atmosphäre und  $103 \text{ W/m}^2$  (30 %) sind Albedo (*Reflektion von der Boden-oberfläche*). (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt>) Wenn der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre um einen Faktor 2 höher wäre, dann würden rund  $30 - 80 \text{ W/m}^2$  mehr von der Atmosphäre zurückbehalten. Da die Atmosphäre dann wärmer wäre, würde sie auch etwas mehr nach aussen abstrahlen. Die Berechnung der Erwärmung der Atmosphäre durch den höheren  $\text{CO}_2$ -Gehalt ist jedoch keine einfache Dreisatzrechnung. Solche Überlegung zeigt jedoch, wie wichtig es ist, dieses Gleichgewicht zu erhalten und nicht durch erhöhten  $\text{CO}_2$ -Ausstoss, sprich Verbrennung grosser Mengen an fossilen Brenn- und Treibstoffen, zu stören.

Der globale Kohlendioxydgehalt der Erdatmosphäre hat im letztem Jahr (2013) den Wert von  $400 \text{ ppm}$  (0.04 Vol.-%) überschritten und steigt weiterhin steil an, pro Jahr um rund  $2 \text{ ppm}$ . In den letzten  $400^{\circ}000$  Jahren lag er in einem Bereich zwischen  $180$  und  $280 \text{ ppm}$  (diese Schwankungen sind eine Folge der Eiszeiten), vor der industriellen Revolution betrug er zwischen  $260$  und  $280 \text{ ppm}$ .

## 10. Die Erde: ein einzigartiger Planet?

Berücksichtigt man, dass es im Universum vermutlich rund  $10^{11}$  Galaxien (*also 100 Milliarden*) gibt mit im Mittel je  $10^{11}$  Sternen, also insgesamt  $10^{22}$  Sterne (*10 Trilliarden*), und geht man davon aus, dass nicht allen von diesen Planeten haben, und von diesen wiederum nur ein kleiner Anteil Erde-ähnlich sind, müsste es immer noch eine grossen Anzahl Planeten geben, auf denen Leben wie auf dem unsrigen möglich sein könnte.

Im Folgenden sind – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einige mögliche Voraussetzungen für einen belebten Planeten wie den unseren aufgelistet. Es braucht ein Planetensystem mit einem einzigen Zentralstern, also **kein Doppelsternsystem**, wie es bei 60 – 70 % der Sterne unserer Milchstrasse (die Hälfte im Universum) der Fall ist. Der **Zentralstern** darf nicht zu klein sein, sonst kommt die Wasserstofffusion nicht in Gang, aber auch nicht zu gross, sonst ist die Dauer diese Phase zu kurz um die Evolution des Lebens auf einem seiner Planeten zu ermöglichen. Bei einem Stern mit 30 Sonnenmassen dauert die Phase des Wasserstoffbrennens nur noch rund 2 Millionen Jahre, im Gegensatz zu unserer Sonne, bei der diese Phase rund 10 Milliarden Jahre dauert. Die Erde hat ein Alter von 4.6 Milliarden Jahren und hat für die Entwicklung des Lebens relativ lange gebraucht. Die ersten Formen primitiven Lebens entstanden vor etwa 3 bis 4 Milliarden Jahren. Der *Homo Sapiens Sapiens* kam erst vor nicht mal 200'000 Jahren, das sind wenige Sekunden vor Mitternacht, wenn man das Alter der Erde auf 24 Stunden zusammendrückt.

Die **Energieproduktion** des Zentralsterns soll möglichst stabil sein, also Schwankungen höchstens im Promille-Bereich aufweisen. Das Maximum seines **Strahlungsspektrums** sollte im sichtbaren Bereich bei Gelb-Grün liegen. Das betreffende **Sonnensystem** sollte sich in einem Gebiet mit wenig interstellarem Staub und Material befinden, weiter nicht zu nahe bei Zentrum der Galaxie, wo sich möglicherweise eine (super-)massives schwarzes Loch (**SMBH**) befindet.

Der **Planet** soll ein «metallischer», also ein Eisen-/Steinplanet mit einer Dichte zwischen 5 und 8  $\text{g/cm}^3$  sein und nicht ein Gasplanet wie etwa Jupiter. Er soll nicht zu klein sein, da er sonst seine Atmosphäre verliert, aber auch nicht zu gross, da sonst die Gravitation zu stark wäre.

Er soll ein **Magnetfeld** haben zur Ablenkung der kosmischen Strahlung, was beispielsweise beim Mars nicht in ausreichendem Mass der Fall ist. Das Magnetfeld verhindert zusätzlich, dass die Atmosphäre des Planeten durch den Sonnenwind weggeblasen wird.

Die **Rotationsfrequenz** soll im Bereich eines Tages liegen (*günstig für den biologischer Rhythmus*), nicht wie beim Merkur, der sehr langsam rotiert: Er dreht sich nämlich während eines Umlaufes um die Sonne nur dreimal um seine eigene Achse. Der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht beträgt demzufolge dort mehrere hundert Grad.

Seine **Bahn** soll annähernd kreisförmig und nicht elliptisch sein um stabile Temperaturen sicherzustellen. Seine **Rotationsachse** soll leicht geneigt sein für die Jahreszeiten. Er soll **Wasser** enthalten und im richtigen Abstand zum Zentralstern sein (*der günstige Toleranzbereich beträgt nur wenige Prozente*), sodass Wasser an der Oberfläche mehrheitlich flüssig ist, also nicht grösstenteils gefroren oder in Form von Wasserdampf vorliegt. Letzteres würde nämlich den Treibhauseffekt erhöhen. Er soll eine **Sauerstoffatmosphäre** haben, aber doch die richtige Menge **Treibhausgase** (*im Wesentlichen  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf*) für die Strahlungsbilanz: Ohne diese Treibhausgase würde die durchschnittliche Temperatur der Erdatmosphäre bei  $-18^\circ\text{C}$  und nicht bei  $+15^\circ\text{C}$  liegen.

Ein solches Sonnensystem sollte am richtigen Ort innerhalb der **Galaxie** sein, nicht zu nahe bei gefährlichen Strahlenquellen und nicht zu nahe bei andern grossen Sternen, sodass er nicht durch die Explosion einer **Supernova** zerstört werden könnte, aber auch nicht zu weit entfernt, damit er bei

deren Bildung auch die schweren Elemente bis zu den Aktiniden aufnehmen kann, wie sie erst bei der Explosion einer Supernova erzeugt werden. Die Erde besteht nämlich aus mehrfach «rekzykliertem» Material, da in den Sternen nur die Elemente bis maximal zum Eisen entstehen können.

Der Planet soll einen **Mond** haben, der seine Bahn und seine Rotationsachse stabilisiert und für die Gezeiten verantwortlich ist. Die natürliche **Radioaktivität** in der Kruste des Planeten (*Kalium-40* sowie *Uran, Thorium und deren Folgeprodukte*) sorgt für die Erdwärme, für den Vulkanismus, die Plattentektonik und die Erzeugung von Helium. Auf der andern Seite legt das allmähliche Abklingen dieser natürlich, radioaktiven Elemente durch den radioaktiven Zerfall auch in etwa den günstigsten Zeitraum für die Entwicklung höherentwickelten Lebens auf dem Planeten fest: Wenn dieses zu früh entstehen würde, wäre die Strahlung zu stark und würde das Leben abtöten. Die **andern Planeten** dieses Sonnensystems reinigen im Weiteren als «kosmische» Staubsauger die Umgebung des Planeten vor Asteroiden und andern Körper, die der Erde gefährlich werden könnten. Die **Nachbarplaneten** sollten keine exzentrischen Bahnen haben um Kollisionen und Instabilitäten der Planetenbahn zu vermeiden.

Zur **Entstehung des Lebens** braucht es eine ganze Reihe weiterer Voraussetzungen – soweit diese überhaupt bekannt sind – deren Auflistung übersteigt allerdings bei weitem die Kenntnisse des Verfasser und würde zudem den Umfang diesen Text sprengen. Hinzu kommen weiter die ganz besonderen Eigenschaften der für das Leben wichtigsten Elemente wie Wasser und Kohlenstoff, die in vielen von denjenigen der andern Elemente abweichen. Erwähnt sei nur etwa die **Dichteanomalie des Wassers** (*die grösste Dichte hat Wasser nicht in der festen Form, also als Eis, sondern in der flüssigen Form bei 4°C*): Ohne diese wären Meere und Seen mit Eis gefüllt und es könnte kein Leben entstehen. Trotz dieser Einzigartigkeit der Erde kann nicht ausgeschlossen werden, dass es im All möglicherweise noch andere Erde-ähnliche Planeten mit Leben gibt. Die nach dem amerikanischen Astrophysiker benannte Drake-Gleichung (FRANK DRAKE, \*1930) erlaubt, gewisse, allerdings nur sehr vage, Spekulationen über die mögliche Anzahl Zivilisationen in unserer Milchstrasse. Sofern solche existieren, dürften sie jedoch in so grosser Entfernung sein, dass eine Kontaktaufnahme geschweige denn ein Besuch nicht realistisch erscheint. Hinzu kommt, dass solche Zivilisationen auch noch in der gleiche Phase ihrer Evolution sein müssten wie die unsrige, also in einem extrem kleines Zeitfenster von etwa 200'000 Jahren, also nur einem Hundertstel Promille im Vergleich zum Alter des Universums von 13.7 Mrd. Jahren.

## 11. Literaturangaben

- [1] HANNU KARTTUNEN, PEKKA KRÖGER, HEIKKI OJA, MARKKU POUTANEN, KARL JOHAN DONNER: *Astronomie – Eine Einführung*, Springer, 1990, ISBN 3-540-52339-1
- [2] KENNETH R. LANG: *Die Sonne – Stern unserer Erde*, Springer, 1996, ISBN 3-540-59437-X
- [3] MARTIN HARWIT: *Astrophysical Concepts*, Springer, 2006, ISBN 978-0-387-32943-7
- [4] MATHIAS SCHOLZ: *Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik: Band 12: Die Sonne als Stern*. [http://www.astronomie.de/uploads/media/Kleines\\_Lehrbuch\\_der\\_Astronomie\\_und\\_Astrophysik\\_Band\\_12.pdf](http://www.astronomie.de/uploads/media/Kleines_Lehrbuch_der_Astronomie_und_Astrophysik_Band_12.pdf)
- [5] Christoph Pöllmann: *Sonnenaktivität – Vortrag im Rahmen des Seminars «Meteorologie und Klimatologie» an der Universität Regensburg, Dezember 2009*. [http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt\\_files/skripten/Sonne.Poellmann.pdf](http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/Sonne.Poellmann.pdf)
- [6] Ralf Klessen: *Sternentstehung – vom Urknall bis zur Geburt der Sonne*. Elsevier Spektrum 2007, ISBN-13: 978-3-8274-1801-2
- [7] Das Internet ist eine reiche und vielfältige Quelle von Informationen aller Art. Daten dürfen aus dem Internet nicht kritiklos und ohne Überprüfen oder Quervergleiche übernommen werden. Die klassischen Internet-Irrtümer entstehen oft weil jemand unkritisch etwas übernimmt, das ein anderer bereits bei einer dritten Quelle abgeschrieben und diese wiederum von einer vierten Quelle stammen. In diesem Text sind teilweise auch Angaben aus Internetseiten verarbeitet worden, allerdings – ausser dort wo eine Quelle explizit angegeben ist – nicht wörtlich, sondern nur in indirekter und - wo nötig - in ergänzter, überprüfter bzw. korrigierter Fassung.