Teil 2: Dynamisches Sonnensystem – die tatsächlichen Hintergründe des Klimawandels

geschrieben von Leistenschneider | 4. September 2011

Etwa 99,98% des gesamten Energiebetrags der Erde stammt von der Sonne. Der verschwindend kleine Rest kommt aus geothermalen Wärmequellen. CO2 spielt in der Energiebilanz überhaupt keine Rolle! Die von der Sonne abgegebene Strahlungsenergie stammt sämtlich aus ihrer Kernzone (ca. 25% des Sonnenradius), in der die Fusion abläuft. Sie entsteht aus dem Energieüberschuss, der bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium entsteht, da bei der Fusion aus der Wasserstoffmasse knapp 1% weniger Helium entsteht. Die emittierte Energie besteht hauptsächlich aus Photonen, aber auch aus Neutrinos, wobei die Neutrinos die Kernzone unmittelbar verlassen, die Photonen durch Wechselwirkung mit dem Plasma hierzu im Mittel ca. 10 Mio. Jahre benötigen.

Die Sonne steigert als sog. Hauptreihenstern ihre Strahlung alle 100 Mio. Jahre um ca. 1%. Bei der Kernfusion entsteht aus 4 Wasserstoffatomen ein Heliumatom, welches etwa die Masse der 4 Wasserstoffatome hat (minus dem geringen Rest, der bei der Fusion nach der Einstein-Formel in Energie umgewandelt wird). Die Zahl der Atome nimmt dadurch im Kern langsam ab. Eine geringere Anzahldichte der Atome kann nicht genauso viel Gegendruck im Sonnenzentrum erzeugen wie die Wasserstoffatome zuvor, wodurch sich das Sonnezentrum weiter zusammenzieht und sich Druck und Dichte dadurch so lange erhöhen, bis der Druck gegen die Gravitation der darüber liegenden Schichten wieder im Gleichgewicht ist – die Schichten tragen kann. Die höhere Dichte und Temperatur im Sonnenzentrum bewirken eine schnellere Kernfusion. Die äußeren Schichten der Sonne werden dadurch vergrößert und die Sonnenleuchtkraft steigt an. Die energieabstrahlende Oberfläche vergrößert sich. Die folgenden Abbildungen und Erläuterungen geben einen Einblick in die Klassifizierung und den Lebenszyklus der Sonne.

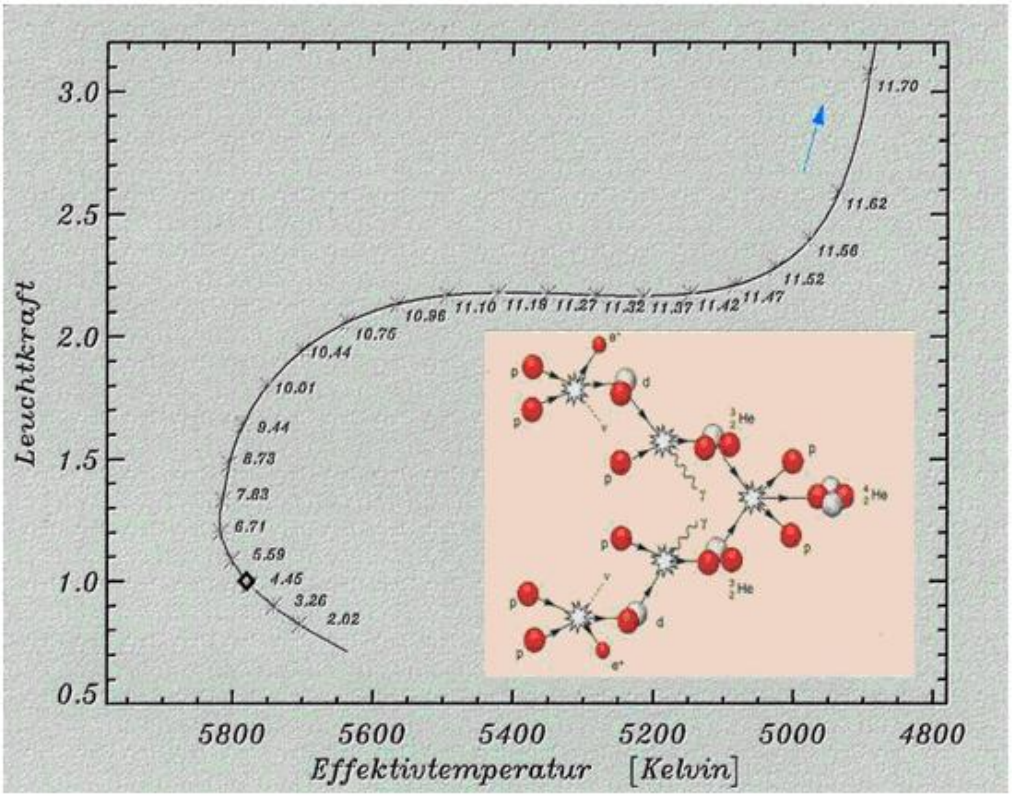


Abbildung 14 zeigt, wie sich im Lebenszyklus der Sonne ihre Leuchtkraft ändert.

Sowohl Temperatur und Leuchtkraft der Sonne ändern sich ständig als Ergebnis der Kernfusion. Der sich daraus ergebene Verlauf zeigt Abbildung 14. Die Zahlen bedeuten das Alter der Sonne in Milliarden Jahren. Der heutige Wert ist durch ein diamantenes Symbol gekennzeichnet. Quelle: (hier). Die kleine Abbildung zeigt die Proton-Proton-Reaktion über Deuterium zu Helium, wie sie im Innern der Sonne abläuft.

Hauptreihenstern “Sonne“

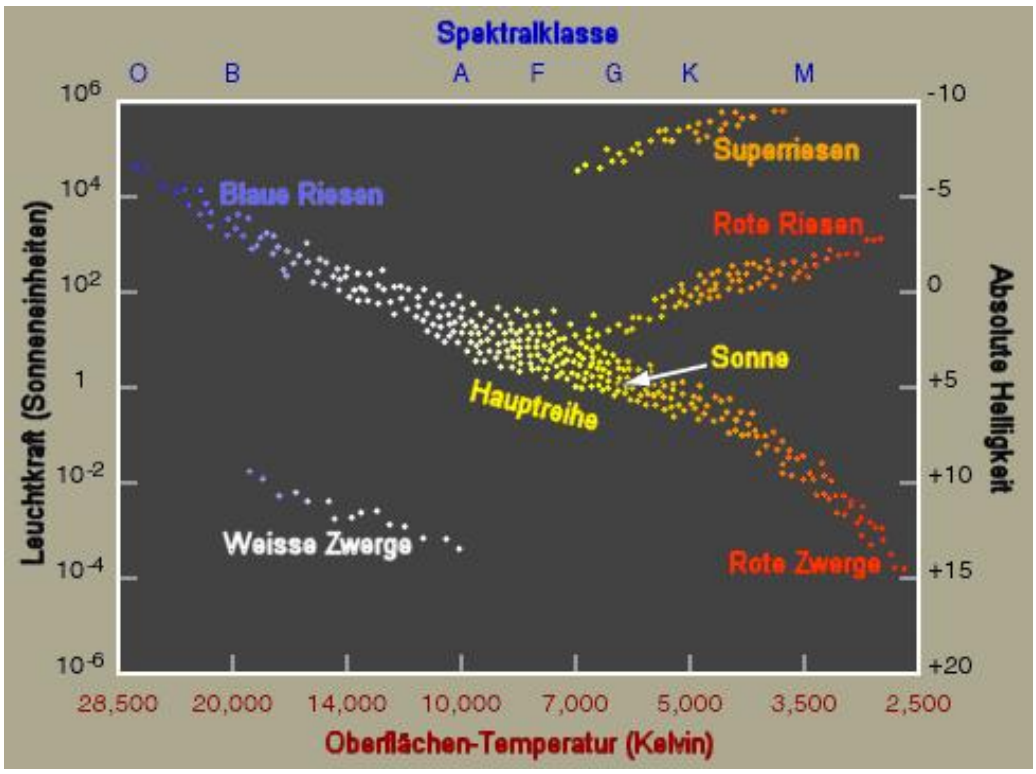


Abbildung 15a zeigt die Einstufung der stellaren Objekte im Hertzsprung-Russell-Diagramm, nach ihrer Leuchtkraft und Spektralklasse. Die Spektralklasse ist in der Astronomie eine Klassifizierung der stellaren Objekte nach dem Aussehen ihres Spektrums. Mit dem obigenDiagramm lässt sich die Entwicklungsverteilung der stellaren Objekte aufzeigen. Die Sonne ist dabei der Hauptreihe und der Spektralklasse G zugeordnet. Exakt der Klasse G2.

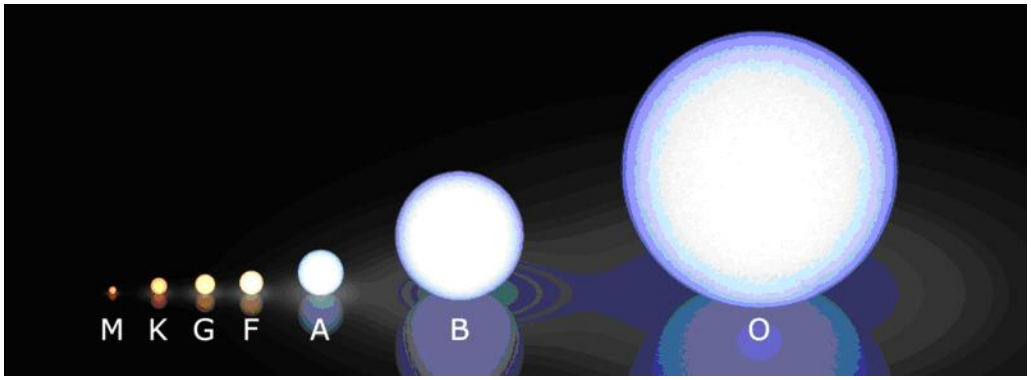


Abbildung 15b zeigt den Größenvergleich der stellaren Objekte in den jeweiligen Spektralklassen nach “Morgan-Keenan“ (MK-System).

Entwicklungsphasen der Sonne

Die Sonne entwickelte sich vor ca. 4,6 Milliarden Jahren in einem Spiralarm am Rande unserer Galaxie aus einer Gas- und Staubwolke. Die Gas- und Staubwolke bestand zu etwa 82% aus Wasserstoff, zu 17% aus Helium und zu 1% aus anderen Elementen. Materieteilchen kamen sich so nahe, dass sie durch ihre gegenseitige Massenanziehung zu verklumpen begannen.

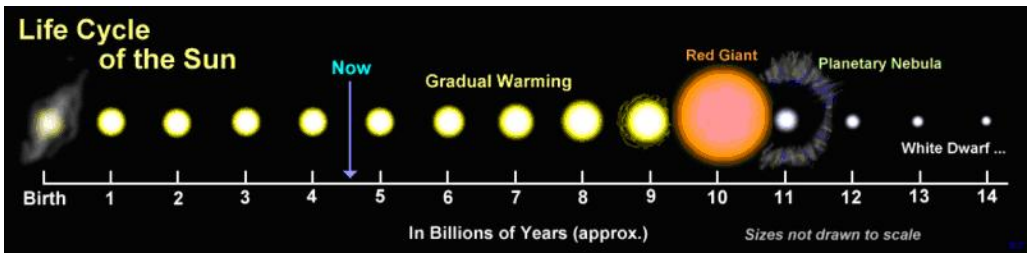


Abbildung 16 zeigt die Entwicklungsphasen (Lebenszyklus) der Sonne. Nachdem sie vor ca. 4,6 Milliarden Jahren mit der Zündung der Kernfusion in ihrem Innern entstanden ist, wirkte der Strahlungsdruck der Kontraktion der Sonne, hervorgerufen durch ihre Schwerkraft, entgegen, so dass sich ein Gleichgewicht einstellen konnte und die Sonne das Stadium eines Hauptreihensterns erreichte, in dessen Phase sie ca. 11 Milliarden Jahre verbleibt.

Die Supernovae eines Roten Überriesen (massereicher Stern mit 10 – 50 Sonnenmassen) am Rand der Galaxie, schleuderte vor ca. 4,6 Milliarden Jahren in diese Wolke große Mengen schwerer Elemente, wie Silizium und Eisen, wodurch die Gas- und Staubwolke kollabierte. Unter der Schwerkraft begann sie sich langsam zu verdichten und durch die Schockwellen (Impuls) der Supernovae zu drehen. In ihrem Zentrum wurde die Wolke immer dichter komprimiert, wodurch Druck und Temperatur immer weiter anstiegen. Dies bewirkte, dass große Energiemengen in Form von Strahlung abgegeben wurden. Ein Protostern war entstanden.

Die Abbildungen zeigen exemplarisch zwei galaktische Wolken, in denen derzeit Sterne entstehen. Abbildung 17a links zeigt den 1.500 Lichtjahre (LJ) entfernten Pferdekopfnebel mit einem Durchmesser von 3 LJ. Abbildung 17b rechts, den 7.000 LJ entfernten Adlernebel mit einem Durchmesser von 20 LJ (NASA).

Durch weitere Verdichtung der Teilchen im Zentrum, wurde die elektro-magn. Abstoßung der Teilchen überwunden und die Protonen verschmelzten miteinander. Die Kernfusion hatte eingesetzt. Aus dem Protostern ist ein Stern entstanden – die Sonne. Bei der Entstehung des Sonnensystems wurden über 99% der Materie in der Sonne gebunden. Aus dem Rest bildete sich durch immer schnellere Drehung eine abgeflachte Scheibe, aus der sich zuerst Ringe, dann Protoplaneten und schließlich die Planeten mit ihren Monden bildeten.

Abbildung 18a links zeigt die Überreste der Supernovae LMC N 63A in der Großen Magellanschen Wolke, unserer Nachbargalaxie. Es ist deutlich zu sehen, dass Elemente weit im Universum verteilt werden. Abbildung 18b rechts zeigt in bildhafter Darstellung eine Planetenentstehungsscheibe, beides Quelle: NASA.

Die Strahlungsleistung der Sonne war in den ersten Milliarden Jahren deutlich geringer als heute. Vor zwei Milliarden Jahren betrug sie nur ca. 80% ihres heutigen Wertes, so dass im Erdzeitalter Archaikum und Proterozoikum weite Teile der Erde mit Eis überzogen waren (Abbildung 19, Quelle: Cornell University).

Abbildung 19

Im Alter von 5,5 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°C (Bounama, 2004). 1 bis 2 Milliarden Jahre später, werden 100°C erreicht.

In ca. drei Milliarden Jahren werden Milchstraße und Andromeda (unsere etwas größere Nachbargalaxie in 2,2 Mil. LJ Entfernung) mit einer Geschwindigkeit von über 430.000 Stundenkilometern zusammen stoßen und schließlich miteinander verschmelzen. Als Ergebnis entsteht eine neue, ellipsenförmige Galaxie. Nach Berechnungen könnte die Sonne mit ihren Trabanten am Rand der neuen Supergalaxie ihr Dasein finden. Sie könnte jedoch auch durch den kosmischen Crash zerfetzt, oder das Planetensystem durch das galaktische Inferno auseinander gerissen werden.

Abbildung 20a links zeigt die 2,2 Millionen Lichtjahre entfernte Andromeda-Galaxie. Sie ist wie die Milchstraße, eine ausgedehnte Balkengalaxie, Quelle: NASA. Die Abbildung 20b rechts zeigt in künstlerischer Darstellung, wie sich von der Erde aus das Himmelsspektakel in ca. 3 Milliarden Jahren abzeichnet, Quelle: James Gitlin/STScI (**S**pace **T**elescope **Sc**ience **I**nstitute).

Galaktische Crashs ganzer Galaxien sind nichts Ungewöhnliches, sondern kommen im Weltall immer wieder vor. In der Frühzeit des Universums waren solche Crashs „an der Tagesordnung“.

Abbildung 21 zeigt die beiden kollidierenden Galaxien NGC 2207 und IC 2163 (Entfernung: 144 Mio. LJ), Quelle: NASA. NGC steht für ”**N**ew **G**eneral **C**atalogue of Nebulae and Clusters of Stars” und IC für ”**I**ndex-**C**atalog”.

Überleben die Sonne und das Planetensystem diesen kosmischen Crash, werden sich in ca. 6,4 Milliarden Jahren die Leuchtkraft der Sonne verdoppelt und ihre Größe auf das 1,6-fache ihres heutigen Wertes gesteigert haben. Die Erde ist in ihrem Innern nicht mehr flüssig und dadurch gibt es kein irdisches Magnetfeld mehr, welches die starke Sonnenstrahlung abdämpfen könnte und als Filter für Röntgen- und UV-Strahlung, den Sonnenwind wirkt. Die Erde verliert dadurch schnell ihre mittlerweile heiße Atmosphäre.

Der Wasserstoff im Sonnenkern wird in etwa 5 Milliarden Jahren verbraucht sein. Das ausge-brannte Helium-Sonnenzentrum (der sog. Heliumkern) kontrahiert zunehmend und heizt sich so lange auf, bis um das Heliumzentrum herum die Kernfusion des dort noch reichlich vorhandenen Wasserstoffs zu Helium einsetzt. Dies wird als **Wasserstoff-Schalenbrennen** bezeichnet. Dabei erzeugt die Sonne immer mehr Energie, je mehr das Heliumzentrum kontrahiert und je weiter sich die Wasserstoff-Fusionsschale nach außen frisst. In 6,4 Milliarden Jahren ist die Leuchtkraft bereits doppelt so hoch wie heute, und der Sonnenradius ist um ca. 60% größer als heute. In den folgenden 1,3 Milliarden Jahren wachsen Leuchtkraft und Sonnenradius weiter massiv an. In etwa 7,4 Milliarden Jahren wird von der Erde aus folgendes Bild (rechts, nächste Seite) zu sehen sein.

Abbildung 22b rechts zeigt die Sonne als roter Riese in künstlerischer Darstellung über der Erdoberfläche und links im Vergleich, die heutige Sicht.

Nach weiteren 200 Millionen Jahren erreicht die Leuchtkraft den tausendfachen heutigen Wert und die äußeren Schichten blähen sich um das Hundertfache auf, so dass trotz der größeren Leuchtkraft die Temperatur der Sonnenoberfläche abnimmt und das Sonnenlicht rötlich wird. Die Sonne hat sich zu einem roten Riesen entwickelt. Alles Wasser auf der Erde wird längst verdampft sein. Die folgende Abbildung gibt einen Größenvergleich von der Ausdehnung der Sonne.

Abbildung 23 zeigt die Sonne heute (der kleine gelbe Punkt, links) im Vergleich zur Sonne als rotem Riesenstern rechts mit einem Durchmesser von 1 AE (Astronomische Einheit = Abstand Erde – Sonne). Die Sonne reicht damit fast bis zur heutigen Erdbahn.

Während der Entwicklung der Sonne zum roten Riesen, kontrahiert der ständig wachsende Heliumkern unter dem Einfluss der Schwerkraft immer mehr und wird dabei immer dichter und heißer. Schließlich bilden die Elektronen im Heliumkern bei großer Dichte ein sog. “entartetes Fermi-Gas“, das ähnlich einer Flüssigkeit zunächst nicht weiter zusammengedrückt werden kann.

Die Temperatur wird den sehr hohen Wert von 100 Millionen Kelvin im Heliumzentrum erreichen und noch überschreiten (das heutige Sonnenzentrum hat etwa 15 Millionen Kelvin). Bei dieser Temperatur (und Druck) zündet die Heliumfusion, bei der Helium zu Kohlenstoff fusioniert.

Das Helium im Sonnenzentrum wird im sog. Helium-Flash explosionsartig in Kohlenstoff umgewandelt. Innerhalb einiger Minuten wird dabei eine Energie von der Größenordnung einer kompletten Milchstraße erzeugt. Die

Energie gelangt jedoch nicht das außen, sondern wird dazu benötigt, dass entartete Zentrum (Fermi-Gas) aufzuheben. Das Heliumzentrum dehnt sich dabei aus. Das übrige Helium im Sonnenzentrum fusioniert langsam zu weiterem Kohlenstoff und teilweise fusioniert auch Kohlenstoff mit weiterem Helium zu Sauerstoff.

Während dem Helium- und Wasserstoff-Schalenbrennen schrumpft die Sonne aufgrund des nachlassenden Gegendrucks zur Gravitation wieder auf ca. ihren 10-fachen heutigen Wert. Aus der roten Riesensonne wird eine kleinere weiße Riesensonne, ein sog. “Horizontalast-Stern“. Für eine gewisse Zeitspanne als Horizontalast-Stern pulsiert sie dabei sogar. Sie ist dann ein “RR-Lyrae-Stern“ (diese verändern ihre Leuchtkraft streng periodisch und sind nach dem Referenzstern “RR Lyrae“ im Sternbild Lyra benannt). Nach weiteren 100 Millionen Jahren ist auch das Helium im Zentrum verbraucht und in Kohlenstoff und Sauerstoff umgewandelt. Das Kohlenstoff-Sauerstoff-Zentrum kontrahiert bis auf Erd-Größe, wobei mehr als die Hälfte der gesamten Sonnenmasse sich in diesem sehr kompakten heißen Zentrum konzentriert.

In dem viel dünneren Gas darüber bildet sich eine Helium-Fusionsschale, über der weiterhin die Wasserstoff-Fusionsschale brennt. Die äußeren Schichten der Sonne blähen sich insgesamt wieder stark auf und kühlen ab. Es entsteht erneut für kurze Zeit (etwa 20 Millionen Jahre) ein roter Riese, der sogar noch größer ist als zuvor – etwa 200-mal größer als die heutige Sonne und mit der 5.000-fachen Leuchtkraft. Damit reicht die Sonne über die heutige Erdbahn. Aufgrund des Masseverlustes der Sonne durch den starken Sonnenwind und der damit verringerten Schwerkraft, könnte sich nach Modelrechnungen die Erde von der Sonne auf etwa den 1,7-fachen Abstand von heute entfernen.

Die Wanderung der Helium-Fusionsschale nach außen lässt die rote Riesensonne schließlich instabil werden. Über einen Zeitraum von etwa 500.000 Jahre bläst die Sonne in mehreren heftigen Zuckungen (sog. “Helium-Flashs“) große Teile der äußeren, nur noch schwach gravitativ gebundenen Sonnenschichten (sie befinden sich relativ weit vom Massekern entfernt) in den Weltraum hinaus und legt ihren inneren, erdgroßen Kern frei.

Durch diesen Prozess verliert sie praktisch das gesamte noch unverbrauchte Brennmaterial, insgesamt etwa 1/3 ihrer Masse. Die sich ausdehnende Gas- und Staubwolke wird als “planetarischer Nebel“ bezeichnet, der aber nichts mit Planeten zu tun hat. Die Bezeichnung hat ihren Ursprung, dass diese Nebel typischerweise in früheren Teleskopen ein ähnliches Aussehen wie Gasplaneten aufweisen. Im Vergleich zur Lebensspanne der Sonne existieren planetarische Nebel nur sehr kurz, meist nicht länger als einige 10.000-Jahre. In unserer Galaxie sind rund 1.500 planetarische Nebel bekannt. Abbildung 24 zeigt einige planetarische Nebel.

Abbildung 24 links zeigt den Katzenaugennebel (NGC 6543) im Sternbild Drache in einer Entfernung von ca. 3.300 Lichtjahren. Die mittlere Abbildung den wohl bekanntesten planetarischen Nebel, den Ringnebel im Sternbild Leier (NGC 6720, Entfernung 4.100 Lichtjahre) und die rechte Abbildung den Eskimo-Nebel (NGC 2392) im Sternbild Zwillinge, in einer Entfernung von 2.900 Lichtjahren.

Das übrig gebliebene sehr heiße nackte Sonnenzentrum aus Kohlenstoff und Sauerstoff nennt man einen “weißen Zwerg“. Obwohl er nur so groß wie die Erde ist, umfasst er etwa die Hälfte der ursprünglichen Sonnenmasse. Die Teilchendichte in einem weißen Zwerg ist so hoch, dass ein Kubikzentimeter seiner Masse im irdischen Gewichtssystem ca. 1 Tonne wiegt.

Abbildung 25: Der von der Sonne übrig gebliebene weiße Zwerg (künstlerische Darstellung), der nur noch die Größe der Erde aufweist, hüllt die Erdoberfläche in ein fahles Licht. Eine Fusion findet auf der übrig gebliebenen Sonne nicht mehr statt. Sie leuchtet, weil sie eine Oberflächentemperatur von über 100.000°C aufweist, die im Verlauf der kommenden Jahrmilliarden langsam abnimmt. Ihre übrig gebliebene Masse von ca. 50% der alten Sonnenmasse reicht aus, um die Erde an sich zu binden. Dass auf der Erde wieder Leben entstehen kann, ist ausgeschlossen.

Nach diesem Ausflug in die Zukunft (die Szenarien entstanden nach Erkenntnissen der Astrophysik und fassen den heutigen Wissensstand grob zusammen), zurück in die Gegenwart, wie die dynamische Sonne auf kleineren Zeitskalen, heute und in jüngster Vergangenheit, Wetter und Klima auf der Erde beeinflusst und weiterhin moderiert. Hierzu betrachten wir die Sonne in ihrem Innern.

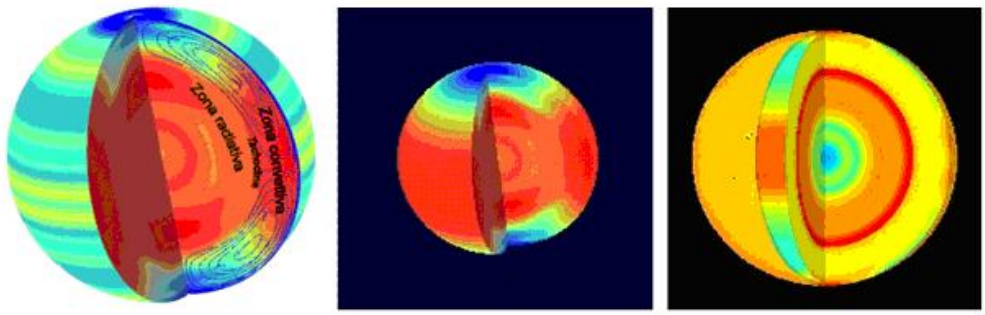


Abbildung 26 zeigt akustisch gemessene Fluktuationen und Wirbel im Sonneninnern (links und Mitte), bzw. gemessene Temperatur-/Dichteänderungen in der Sonne (rechts), Quelle: SOHO. Die Sonne ist kein statisches Gebilde. Ihre Energieschwankungen und deren Auswirkungen auf die Erde auf kleinen Zeitskalen sind ganz beträchtlich, wie in den folgenden Teilen gezeigt wird.

Bisher wurde ausschließlich die Fusionsleistung der Sonne betrachtet.

Darüber hinaus strahlt die Sonne magnetisch erzeugte Energie ins Weltall ab. Während die Fusionsleistung auf kurzen Zeitskalen relativ konstant ist, variiert die magnetische Aktivität der Sonne ganz erheblich und steuert damit unsere Wettersysteme, wie bereits im Teil 1 gesehen und damit unser Klima. Hierzu mehr im 3. Teil.

Raimund Leistenschneider – EIKE

Teil 3 in Kürze

Übersicht über alle Teile:

Teil 1 – Die Sonne bestimmt den Temperaturgang

Teil 2 – Die Sonne, der faszinierende Stern

Teil 3 – Sonnenflecken und ihre Ursachen

Teil 4a – Die Sonnenatmosphäre, Korona, Heliosphärische Stromschicht, interplanetares Magnetfeld

Teil 4b – Die Sonnenatmosphäre, Korona, Heliosphärische Stromschicht, interplanetares Magnetfeld

Teil 5 – Die variable Sonne

Teil 6 – Der Einfluss der Sonne auf unser Wetter/Klima

Teil 7 – Der Einfluss der Sonne auf die Wolkenbedeckung über Svensmark hinaus

Teil 8 – Zukünftige Temperaturentwicklung und deren Schwankungen