

Physik der Hochatmosphäre

Modul: Ausgewählte Kapitel der Allgemeinen Geophysik

Dr. Ralph-Uwe Börner

21.11.22

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkung

Das Skript zur Vorlesung “Physik der Hohen Atmosphäre” entsteht semesterbegleitend und erhebt nicht den Anspruch auf [Vollständigkeit](#) und Korrektheit.

Es wird mit [Quarto](#), einem Open-Source-System zum wissenschaftlichen und technischen Publizieren, entwickelt.

Alle Änderungen sind in [GitHub](#) nachvollziehbar. Ein PDF-Dokument mit aktuellem Inhalt kann dort heruntergeladen werden.

Teil I

Einführung

2 Einführung

Diese Einführung beruht zum großen Teil auf dem Buch von Kertz (1971). Dort werden grundlegende Zusammenhänge zur Physik der Hochatmosphäre physikalisch und mathematisch gut aufbereitet und erläutert. Zum Selbststudium ist dieses Buch sehr zu empfehlen.

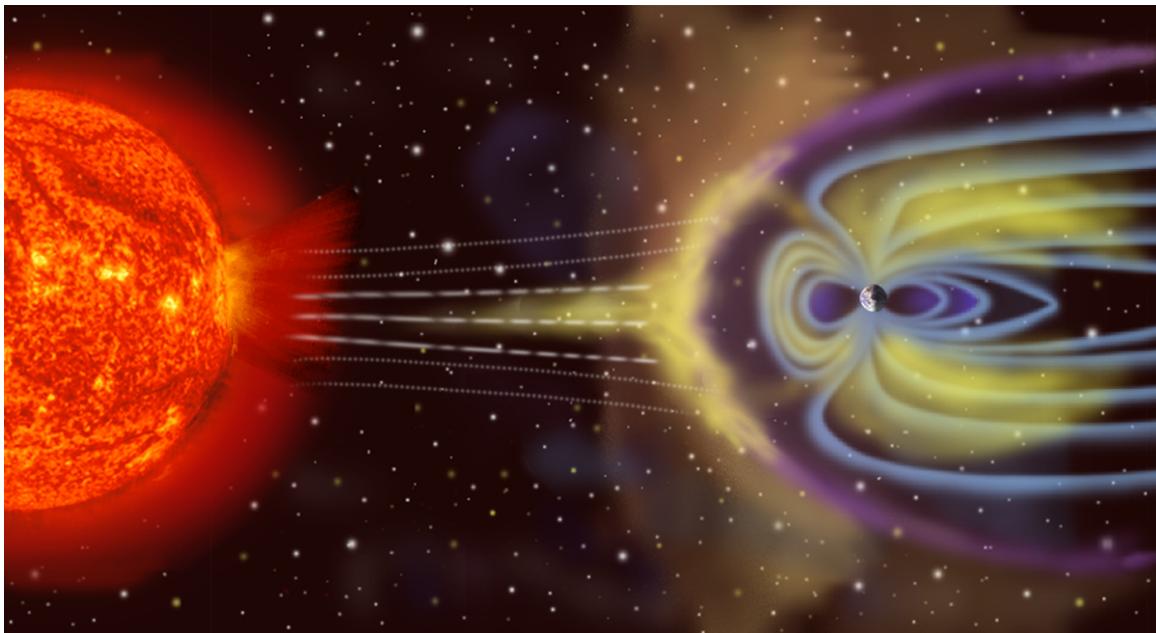


Abbildung 2.1: Künstlerische Darstellung der solar-terrestrischen Beziehungen

In der Physik der Ionosphäre und Magnetosphäre behandeln wir Prozesse im erdnahen Raum. Dort werden physikalische Vorgänge durch das Erdmagnetfeld oder seine Interaktion mit dem interplanetaren Magnetfeld bestimmt.

Eine besondere Rolle spielen hier geladene Teilchen. Wir werden sehen, dass der erdnahen Raum nicht wirklich leer ist, sondern aus einem stark verdünnten Gas aus geladenen und neutralen Teilchen besteht. Die Annahme, dass im Universum Vakuum herrscht, ist falsch. Neben der elektromagnetischen Wellenstrahlung der Sonne beobachtet man auch einen Partikelstrom aus geladenen Teilchen. Dieses Teilchengemisch wird Plasma genannt.

In unserem Sonnensystem findet wir Plasma beispielsweise im Sonnenwind, der als ständiger Strom geladener Teilchen mit Geschwindigkeiten von etwa 400 bis 600 km/s die Sonnenoberfläche verlässt.

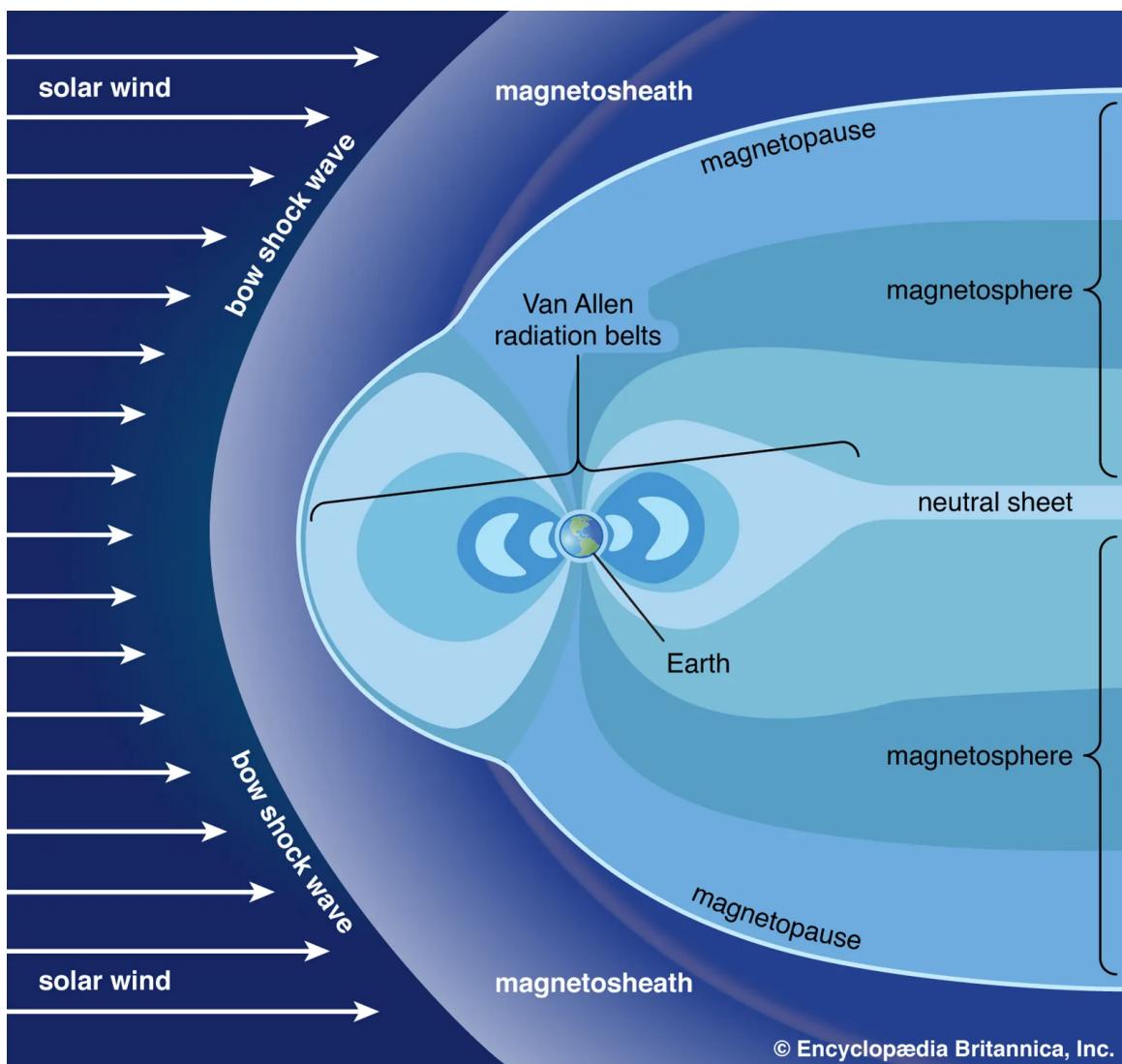


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Magnetosphäre

Gelangt der Sonnenwind in den Wirkungsbereich der Magnetosphäre, werden die geladenen Teilchen des Plasmas einer Kraft ausgesetzt, die durch das irdische Magnetfeld hervorgerufen wird. Diese Kraft ist die *Lorentzkraft*.

Andererseits bringt die elektromagnetische Wellenstrahlung der Sonne Energie in die Atmosphäre ein und führt zu einer höhenabhängigen Ionisierung der Atmosphäre. Die Ionenproduktionsrate ist in der Dynamoschicht besonders hoch. Dort besitzt die hohe Atmosphäre eine beachtliche elektrische Leitfähigkeit. Dort bilden sich großräumige elektrische Stromsysteme.

Die an diese Stromsysteme gekoppelten Magnetfelder können an der Erdoberfläche gemessen werden. Da sie zeitlich variabel und großräumig sind, eignen sich die Variationen als Energiequelle für die Magnetotellurik. Andererseits führen Magnetfeldvariationen zu unerwünschten Störeffekten bei geomagnetischen Messungen. Diese werden durch Variometer erfasst und durch eine Variationskorrektur aus den Messungen eliminiert.

Stromsysteme sind immer an bewegte Teilchenpopulationen geknüpft. Diese können auch in der Magnetosphäre auftreten und bilden die *Van-Allen-Gürtel*. Eine kurzzeitige Erhöhung der Teilchendichte in der Magnetosphäre, vor allem durch Koronale Massenauswürfe auf der Sonnenoberfläche (engl. coronal mass ejection, CME), führt zur Ausbildung von mehreren Stunden bis Tagen andauernden verstärkten Ringströmen von einigen Erdradien Durchmesser, deren messbare magnetische Wirkung als magnetischer Sturm bezeichnet wird.

2.1 Plasma

Unser Universum besteht zu 68 % aus dunkler Energie, zu 27 % aus dunkler Materie und zu 5 % aus gewöhnlicher Materie (Atomen) ([NASA Science](#)).

Die gewöhnliche –*sichtbare*– Materie besteht zu über 99.9 % aus Plasma.

3 Die Atmosphäre der Erde

In Kertz (1971) finden wir die folgende Gliederung der Atmosphäre Abbildung ?? hinsichtlich des Temperaturverlaufs, der Homogenität sowie der Elektronendichte. Von großer Bedeutung für die Physik der Hochatmosphäre ist der Magnetfeldeinfluss.

Unterhalb einer Höhe von 50 km befinden sich 99.9 % der Gesamtmasse der Atmosphäre. Die übrigen 0.1 % verteilen sich auf ein Vielfaches des Erdvolumens.

Die Physik der Hochatmosphäre beobachtet Vorgänge in einem stark verdünnten Gas.

Gliederung der Atmosphäre

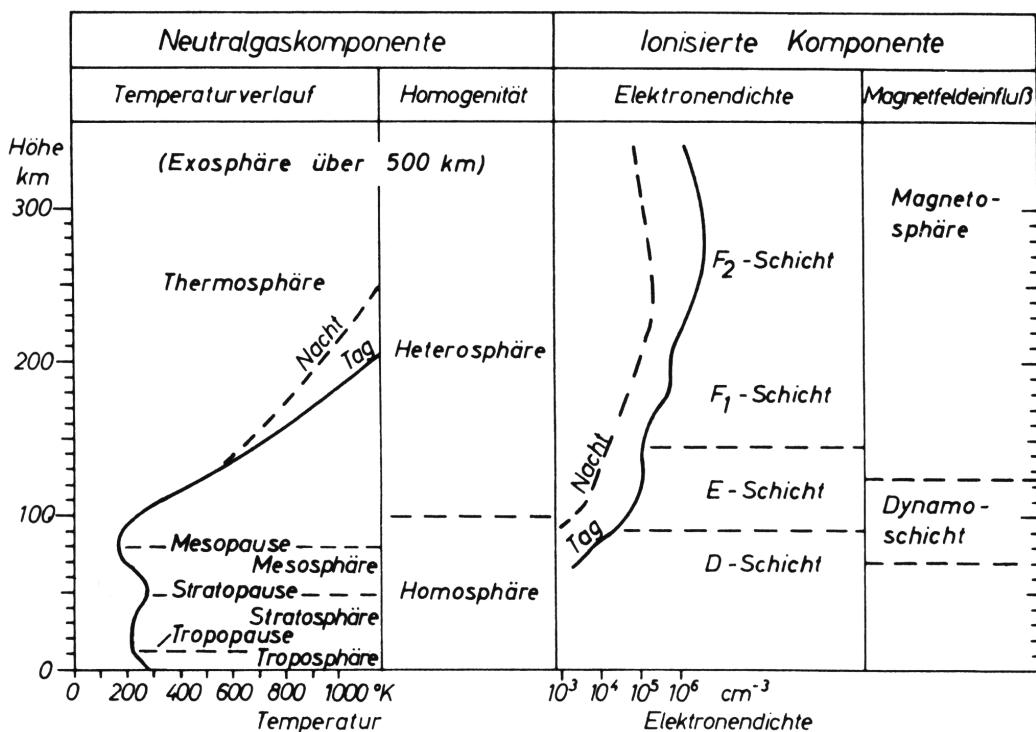


Fig. 78 Zur Nomenklatur der Atmosphäre. Die Schichtgrenzen bei der Einteilung der Neutralgaskomponente nach dem Temperatur-Höhen-Verlauf sind durch Extremwerte definiert. Zur Kennzeichnung der Ionosphärenschichten ist rechts die Elektronendichte als Funktion der Höhe eingetragen.

Abbildung 3.1: Gliederung der Atmosphäre (aus Kertz)

3.1 Prinzipien der Einteilung

Die Sonnenstrahlung bewirkt eine teilweise Ionisation der Luft in der oberen Atmosphäre. Daher ist es sinnvoll, für den ionisierten Anteil eine andere Einteilung als für die Neutralgaskomponente zu benutzen.

3.1.1 Neutralgaskomponente

3.1.1.1 Temperaturverlauf

Man unterscheidet

- Troposphäre: Wettergeschehen, beeinflusst durch Wasser, Erdoberfläche und Erdrotation
- Stratosphäre: Geringe vertikale Durchmischung, Strahlungsabsorption des Ozons führt zu Temperaturzunahme
- Mesosphäre: Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe bewirkt weniger starke Dichteabnahme
- Thermosphäre: Ansteigende Temperatur

3.1.1.2 Homogenität

Es wird unterschieden zwischen Homo- und Heterosphäre.

In den unteren 100 km ist das Neutralgas bei konstanten Mischungsverhältnissen als Folge von Turbulenzen gut durchmischt.

In der Heterosphäre erfolgt eine Entmischung. Mit zunehmender Höhe treten mehr leichte Teilchen auf. In sehr großen Höhen treten wegen der geringen Dichte keine Stöße zwischen den Teilchen auf. Die Teilchen bewegen sich auf Keplerbahnen oder verlassen den Einflussbereich der Erdanziehung, wenn ihre Geschwindigkeiten die Fluchtgeschwindigkeit übersteigen. Dieser Bereich wird *Exosphäre* genannt.

Die Entweichmöglichkeit besteht nur für Neutralgasteilchen. Ionisierte Teilchen verhalten sich anders.

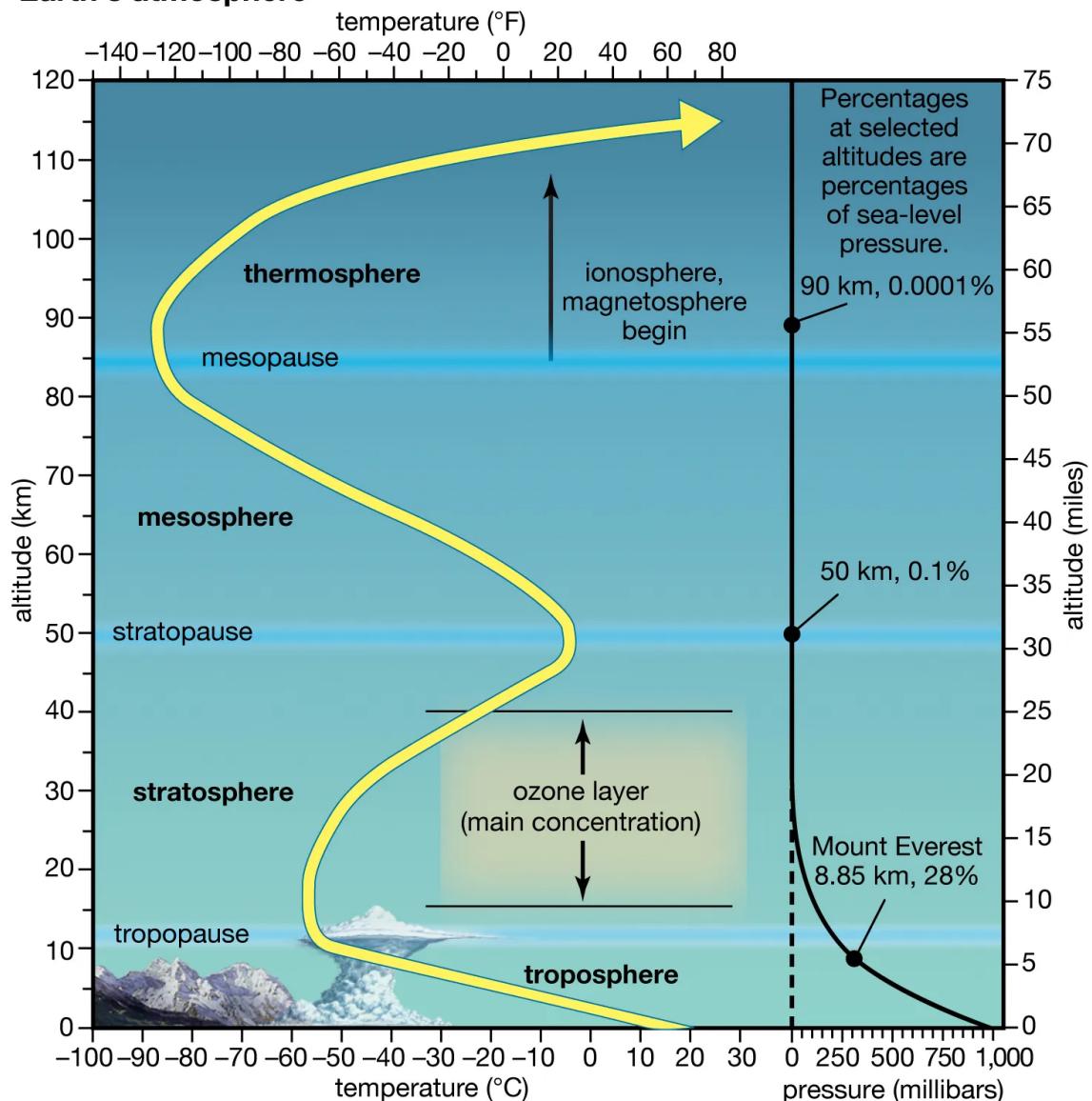
3.1.2 Ionisierte Komponente

3.1.2.1 Elektronendichte

3.1.2.2 Magnetfeldeinfluss

Eine etwas andere Darstellung:

Earth's atmosphere



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Abbildung 3.2: Vertikale Gliederung der Atmosphäre (aus <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere>)

3.2 Die Grenze zur Hochatmosphäre

Die Grenze zur Hochatmosphäre ist nicht einheitlich festgelegt. Sie liegt bei $h > 50$ km.

Warum wird diese Grenze eingeführt? Dies hat verschiedene Gründe, die von der Methode der Erforschung der Atmosphäre, von der Zusammensetzung der Atmosphäre sowie vom Einfluss der solaren Aktivität abhängen.

Vor allem handelt es sich um eine physikalische Einfussgrenze.

3.2.1 Methode der Erforschung

Registrierballons erreichen nur Höhen bis etwa 50 km, darüberhinaus sind entweder nur Momentaufnahmen (etwa wegen der hohen Geschwindigkeit von Forschungsракeten) oder indirekte Beobachtungen möglich.

So geben beispielsweise magnetische Aufzeichnungen an der Erdoberfläche Hinweise auf elektrische Ströme in leitfähigen Schichten der Ionosphäre.

Spektren von Polarlichtern geben Hinweise auf die chemische Zusammensetzung.

An der Ionosphäre reflektierte Radiowellen liefern Hinweise auf die Teilchendichte und Windbewegungen.

3.2.2 Luftchemie

In Höhen bis zu 50 km ist die Luft gleichmäßig durchmischt. Ihre Zusammensetzung entspricht der an der Erdoberfläche. Oberhalb von 50 km tritt eine höhendifferenzierte unterschiedliche Luftzusammensetzung auf, die durch Ionisation, Dissoziation und gravitative Entmischung verursacht wird.,,

3.2.3 Steuerung durch solare Aktivität

Die Dynamik der unteren Atmosphäre äußert sich in kleinskaligen und kurzzeitigen Wettervorgängen.

Störungen der oberen Atmosphäre sind räumlich ausgedehnter und umfassen mindestens die gesamte Tag- oder Nachtseite der Erde. Verursacht werden sie durch Eruptionen auf der Sonne.

Im Gegensatz dazu werden die Prozesse in der unteren Atmosphäre nicht wesentlich von der solaren Aktivität beeinflusst.

Die Grenze zwischen unterer und oberer Atmosphäre ist eine *physikalische Einfussgrenze*.

3.3 Aeronomie

Die Physik der Hochatmosphäre wird auch als Aeronomie bezeichnet (im Gegensatz zur Meteorologie als Physik der unteren Atmosphäre). Die wissenschaftliche Dachvereinigung zur Erforschung der Hochatmosphäre ist die [IAGA](#) (International Association of Geomagnetism and Aeronomy).

Teil II

Die ruhige und aktive Sonne

4 Aufbau der Sonne

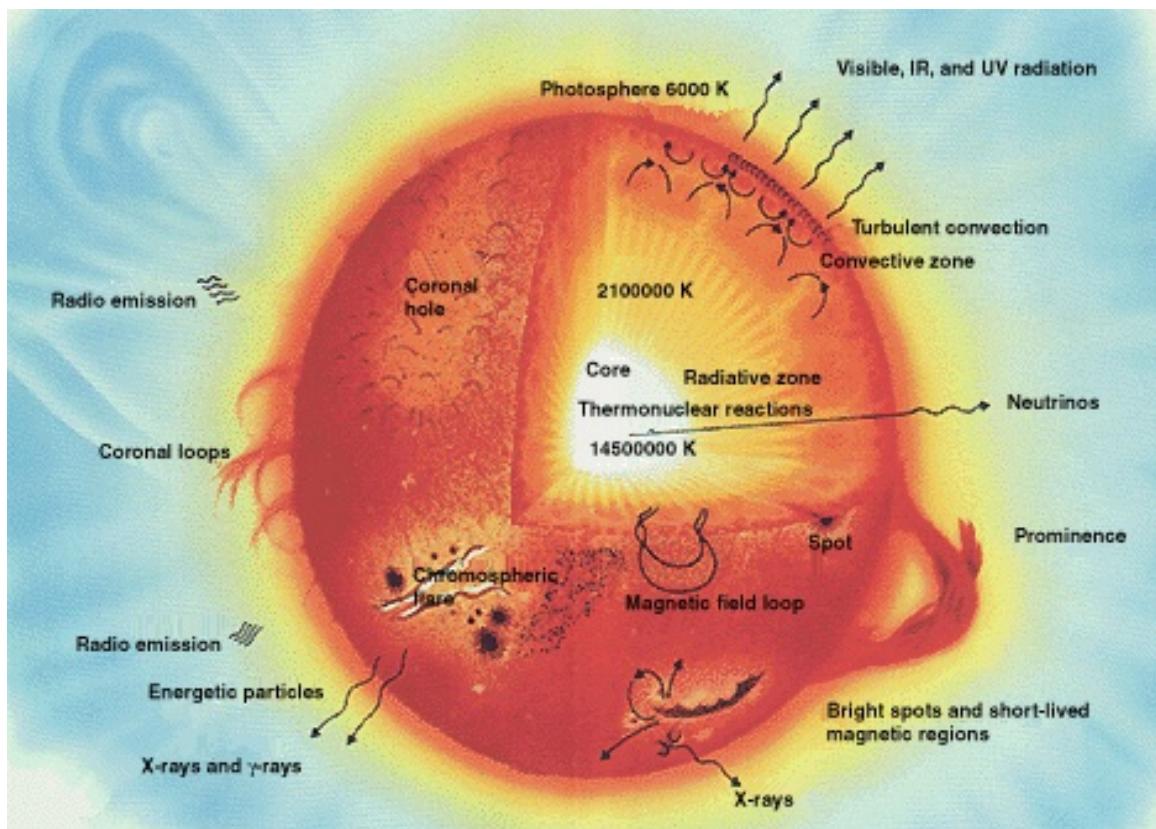


Abbildung 4.1: Aufbau eines sonnenähnlichen Hauptreihensterns (NASA image)

In erster Näherung ist die Sonne kugelsymmetrisch aufgebaut. Sie befindet sich in einem stationären Gleichgewicht ohne Kontraktionen oder Schwingungen.

Die Sonne vereint in sich etwa 99.86 % der Masse des Sonnensystems.

Im Innern der Sonne herrscht ein hydrostatisches Gleichgewicht der nach außen wirkenden Druckkräfte und der nach innen gerichteten Gravitationskräfte. Es gilt

$$\frac{dp(r)}{dr} = -f \frac{\rho(r)m(r)}{r^2}$$

mit

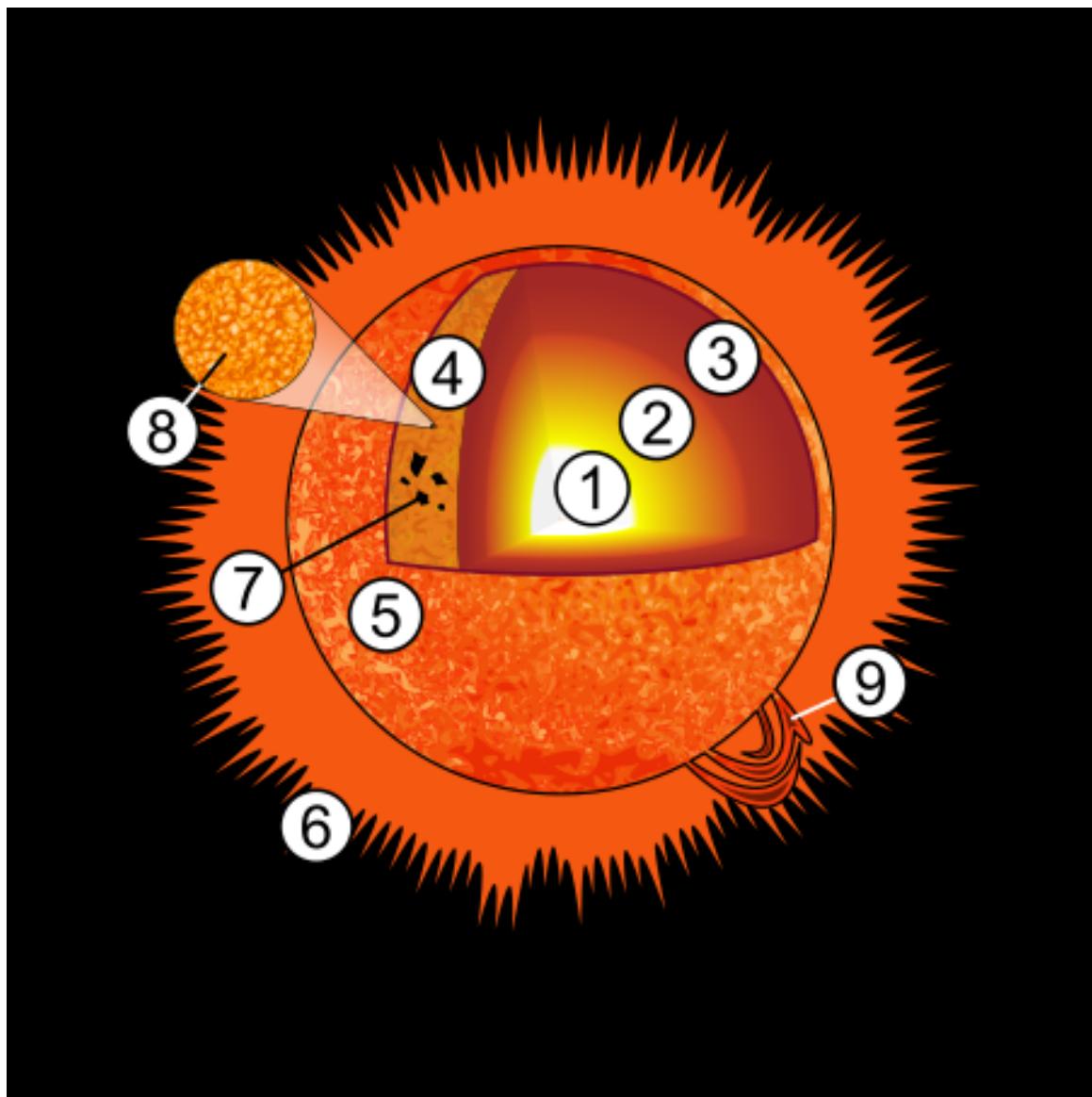


Abbildung 4.2: Schnittdiagramm der Sonne. 1-Kern, 2-Strahlungszone, 3-Konvektionszone, 4-Photosphäre, 5-Chromosphäre, 6-Corona, 7-Sonnenfleck, 8-Granulation, 9-Protuberanz (Wikipedia)

$$m(r) = 4\pi \int_0^r \rho(r)r^2 dr$$

4.1 Energiefreisetzungsprozesse

Die primäre Quelle der Sonnenenergie ist die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Dies geschieht im Kern der Sonne bei Temperaturen von 1.4×10^7 K.

In jeder Sekunde werden etwa 620 Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium umgewandelt.

4.2 Energietransportmechanismen

Energie gelangt nach außen durch

- Strahlung
- Konvektion
- Wärmeleitung

Benötigt wird ein Temperaturgefälle. Wärmestrom $\mathbf{J} = -k\nabla T$.

4.3 Kern

Die Hälfte der Sonnenmasse konzentriert sich innerhalb von 25 % des Sonnenradius. Im Zentrum der Sonne beträgt der Druck 200 Milliarden bar, die Dichte ist 150 g/cm^3 . Die Temperatur im Kern ist 15.7×10^6 K.

Nur im Kern wird thermische Energie durch Kernfusion freigesetzt. 99 % der Fusionsleistung von 3.9×10^{26} W wird innerhalb von 24 % des Sonnenradius erzeugt. In einem Tausendstel des Volumens der Sonne entsteht die Hälfte ihrer Leistung. Die mittlere Leistungsdichte beträgt aber nur 140 W/m^3 .

Die freigesetzte Energie wird durch Strahlung nach außen transportiert.

4.4 Strahlungs- und Konvektionszone

Ab etwa 30 % Sonnenradius findet keine Fusion mehr statt. Wärmeenergie wird neben der Strahlung durch Konvektion transportiert.

Ab 71 % des Sonnenradius wird der Wärmestrom durch Konvektion transportiert. Die Strömungsgeschwindigkeit ist mit ca. 10 m/s gering, die Konvektionszellen sind groß und beständig (Monate bis Jahre), und daher von Rotation und innerem Magnetfeld beeinflusst.

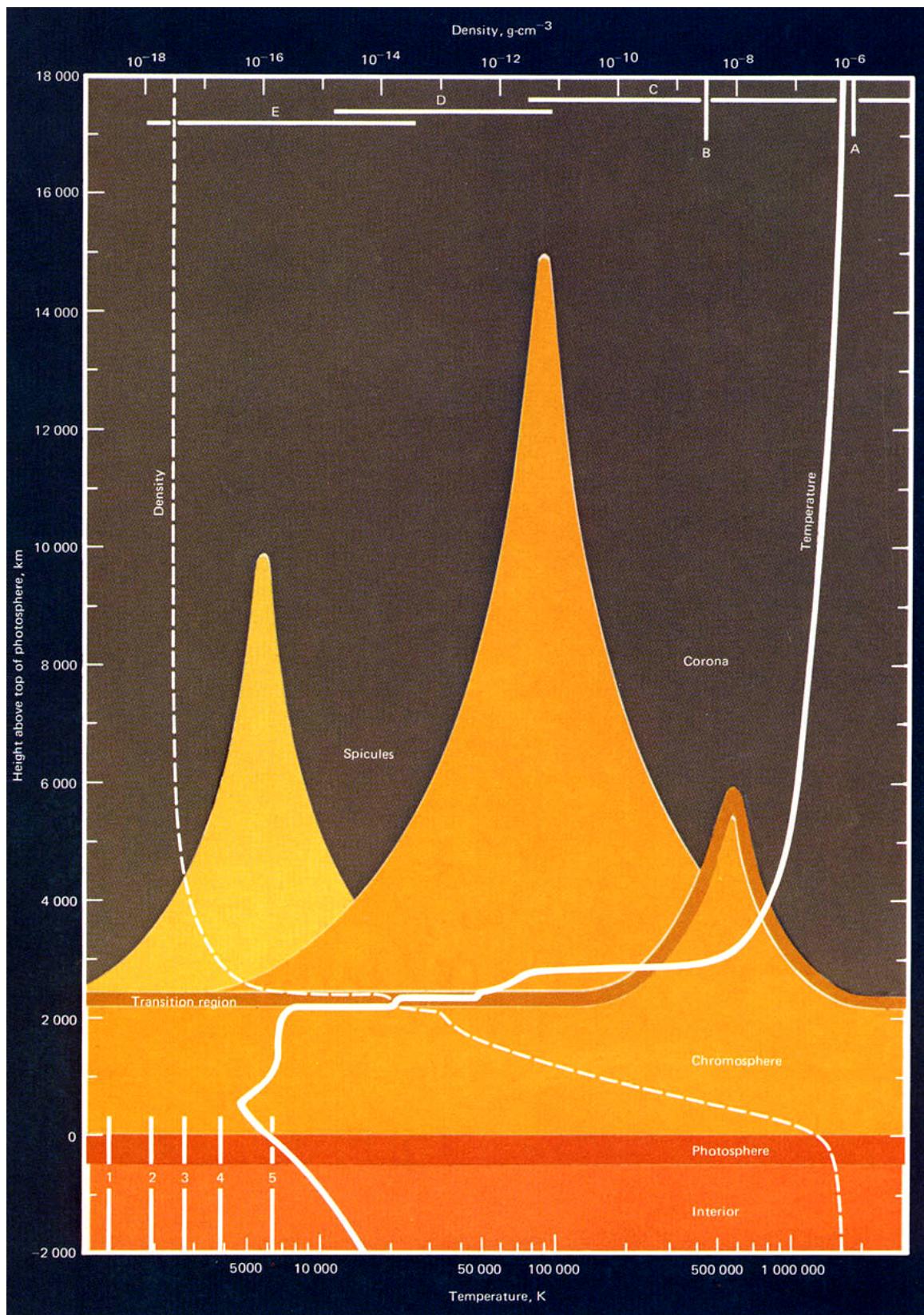


Abbildung 4.3: Temperatur- und Dichtemessungen von Skylab (Quelle: Wikipedia)

4.5 Sonnenoberfläche und Umgebung

4.5.1 Photosphäre

Die Dichte nimmt immer schneller ab, das Material wird durchsichtig und die Photonen können ungehindert entweichen. Am Sonnenrand sieht man unter flacherem Beobachtungswinkel eine höhere, kältere Schicht, wodurch der Rand dunkler erscheint.

4.5.2 Chromosphäre

Oberhalb der Photosphäre liegt die knapp 2000 km dicke Chromosphäre. Die Temperatur nimmt ab, die Dichte ebenso.

4.6 Äußere Atmosphäre

4.6.1 Korona

Oberhalb der Chromosphäre befindet sich die Korona. Sie geht ohne scharfe Grenze in den interplanetaren Raum über. Die Korona erstreckt sich auf über ein bis zwei Sonnenradien. In der Korona regieren Gravitation und Magnetfeld.

4.6.2 Sonnenwind

In der Korona entsteht der Sonnenwind, der mit etwa 300 km/s die Sonne verlässt.

4.7 Magnetfeld

An der Sonnenoberfläche lässt sich das Magnetfeld wegen des Zeeman-Effekts aus spektroskopischen Beobachtungen feststellen. Spektrallinien spalten sich bei Anwesenheit eines Magnetfeldes auf. Der Spektrallinienabstand ist proportional zur Feldstärke.

Die Feldstärke im Umfeld von Sonnenflecken beträgt bis zu 0.4 T.

Das großräumige Magnetfeld lässt sich nur grob durch ein Dipolfeld beschreiben. An der Sonnenoberfläche ist die Feldstärke mit etwa 100,000 nT nur etwa doppelt so groß wie das der Erde auf der Erdoberfläche.

4.8 Differentielle Rotation

Die Strahlungszone rotiert gleichförmig mit einer Periode von knapp 27 Tagen (Frequenz etwa 430 nHz, s. Abb. Abbildung ??) bis zur Tachokline, der Übergangszone zur differentiell rotierenden Konvektionszone.

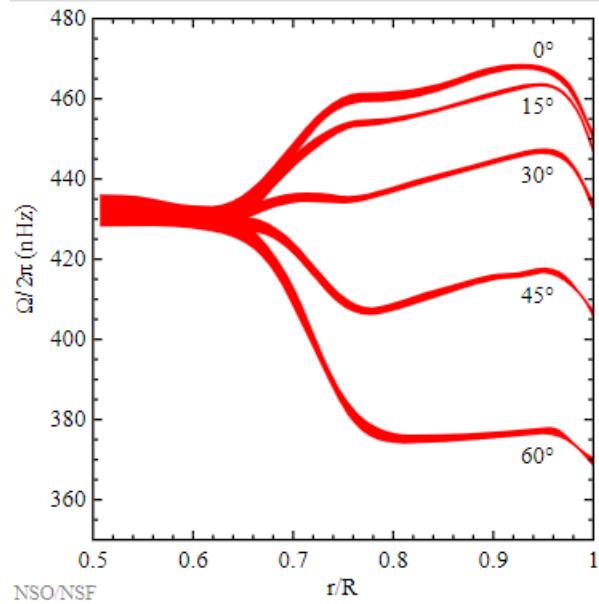


Abbildung 4.4: Radialer Verlauf der Sonnenrotation für verschiedene heliographische Breiten. Ausgehend von der differentiell rotierenden Oberfläche steigt in den oberen 4 % die Winkelgeschwindigkeit steil an, um dann bis zur tachoklinen Region leicht abzufallen. Dort gleicht sie sich an die der nahezu starr rotierenden Strahlungszone an (Quelle: Wikipedia).

5 Die Sonne als Energiequelle

Die Erde umkreist die Sonne in einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn mit Radius 1 AU = 1.495978707×10^8 km.

Die Sonne besitzt eine Strahlungsleistung (“Leuchtkraft”) von 3.828×10^{26} W.

Die scheinbare Größe der Erde aus der Sicht der Sonne beträgt ca. 18 Bogensekunden.

Der Raumwinkel Ω , unter dem die Erde erscheint, beträgt etwa 5.7×10^{-9} sr, damit emittiert die Sonne insgesamt etwa das 2.2×10^9 -fache der Strahlung, die lediglich auf die Fläche der Erde entfällt.

Berechnung der scheinbaren Größe:

$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{R}{d} \right)$$

Berechnung des kanonischen Raumwinkels Ω eines Kegels mit Öffnungswinkel $2\theta = \alpha$:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\theta \sin \theta' d\theta' = 2\pi (1 - \cos \theta)$$

```
using Markdown
R_E = 6.3781e6;
AU = 1.495978707e11;
alpha = 2 * atan(R_E / AU);
bs = alpha * 180 / pi * 3600;
Omega = 2 * pi * (1 - cos(alpha / 2));
Markdown.parse"""
Die scheinbare Größe beträgt $(round(bs, digits=2)) Bogensekunden.

Der Raumwinkel beträgt $(round(Omega, sigdigits=2)) sr.

Die Sonne emittiert das $(round(4 * pi / Omega, sigdigits=2))-fache bezogen auf die Erde"""
# println("Der Raumwinkel beträgt $(round(Omega, sigdigits=2)) sr.")
# println("Die Sonne emittiert das $(round(4 * pi / Omega, sigdigits=2))-fache bezogen auf die Erde")
```

Die scheinbare Größe beträgt 17.59 Bogensekunden.

Der Raumwinkel beträgt 5.7e-9 sr.

Die Sonne emittiert das 2.2e9-fache bezogen auf die Erdscheibe.

5.1 Solarkonstante

```
S = 3.828e26 / 4 / pi / AU^2;
Markdown.parse"""
Die Leuchtkraft der Sonne verteilt sich gleichmäßig (isotrop) auf einer Kugeloberfläche

``S = `` $(round(S, digits=2)) W/m```^2```.
"""")
```

Die Leuchtkraft der Sonne verteilt sich gleichmäßig (isotrop) auf einer Kugeloberfläche. In der Entfernung von 1 AU ergibt sich daraus die Solarkonstante rechnerisch zu

$$S = 1361.17 \text{ W/m}^2.$$

Der über Satellitenmessungen bestimmte Wert ist $S = 1361 \text{ W/m}^2$.

Die Verteilung von Kontinenten und Ozeanen auf der Erdoberfläche führt zur Absorption und unvollständigen Rückstrahlung der Sonneneinstrahlung. Das Rückstrahlvermögen oder die Albedo der Erde ist 0.3, damit beträgt die Absorption 0.7.

Mit der experimentell bestimmten Solarkonstante können wir zwei Größen abschätzen:

- Temperatur auf der Erdoberfläche ohne Einfluss der Atmosphäre
- effektive Oberflächentemperatur eines der Sonne äquivalenten schwarzen Strahlers.

5.1.1 Temperatur auf der Erdoberfläche

Wir benutzen das Stefan-Boltzmann-Gesetz, um die Oberflächentemperatur der Erde ohne Berücksichtigung der Atmosphäre zu berechnen.

5.1.1.1 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung P ein schwarzer Körper der Fläche A und der absoluten Temperatur T aussendet. Es lautet

$$P = \sigma A T^4$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten

$$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$$

Zur Lösung des Problems stellen wir eine Strahlungsbilanz auf, wonach die Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche gleich der Abstrahlung in den Kosmos ist.

Mit der oben angegeben Absorption von 0.7 gilt für die Einstrahlung auf der als Kreisscheibe angenommenen Erdoberfläche

$$P_{in} = 0.7 S \pi R_E^2$$

```
Markdown.parse"""
Die Einstrahlung beträgt bei vollständiger Absorption dagegen
$(round(S * pi * R_E^2 * 1e-15, digits=3)) PW.
""")
```

Die Einstrahlung beträgt bei vollständiger Absorption dagegen 173.958 PW.

Die Einstrahlung beträgt also etwa 174 Petawatt! Die aktuell leistungsfähigsten Laser (LLNL (USA): “Nova Laser”, 2012; Osaka Univ. (Japan): “LFEX”, 2015; EU: “ELI-NP”, 2015) erreichten kurzzeitig 1.25, 2 bzw. 10 PW für 0.5, 1 bzw. < 0.01 Pikosekunden (1 Pikosekunde = 10^{-12} s), was einer Energie von 600, 2000 bzw. 10 J entspricht.

Die Abstrahlung in den Kosmos ist

$$P_{out} = \sigma 4\pi R_E^2 T^4$$

Daraus ermitteln wir die Oberflächentemperatur eines äquivalenten schwarzen Strahlers. Sie lautet

$$T = \sqrt[4]{\frac{0.7S}{4\sigma}}$$

```
S = 1361;
sigma = 5.670374419e-8;
T = (0.7 * S / 4 / sigma)^0.25 - 273.15;
Markdown.parse"""
Die Oberflächentemperatur auf der Erde beträgt ohne Atmosphäre T = $(round(T, digits=1))
""")
```

Die Oberflächentemperatur auf der Erde beträgt ohne Atmosphäre $T = -18.6$ °C.

Somit ergibt sich für die Erde eine Temperatur von ca. -18 °C, die allein verursacht durch die Sonneneinstrahlung, jedoch ohne Berücksichtigung des Einflusses der Atmosphäre (Treibhauseffekt) auf der Erdoberfläche herrschen würde. In der Realität misst man dort eine deutlich höhere Temperatur von im Mittel ca. 14 °C. Die Differenz von 32 K wird durch den Treibhauseffekt verursacht.

5.1.2 Effektive Oberflächentemperatur der Sonne

Ebenso lässt sich mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes aus den oben gegebenen Werten die effektive Oberflächentemperatur der Sonne errechnen.

Der Radius der Sonne beträgt $R_S = 6.963 \times 10^8$ m. Ihre Leuchtkraft lässt sich über die Solarkonstante S und den Radius d der Erdumlaufbahn angeben. Es gilt

$$P_{out} = 4\pi d^2 S$$

Die Fläche des angenommenen schwarzen Strahlers ist

$$A = 4\pi R_S^2$$

Die Temperatur auf der Sonnenoberfläche ist demnach

$$T = \sqrt[4]{\frac{P_{out}}{\sigma A}}$$

Wir setzen ein und erhalten

```
P_out = 4 * pi * AU^2 * S;
R_S = 6.96342e8;
A = 4 * pi * R_S^2;
T = (P_out / sigma / A)^0.25;
Markdown.parse"""
Die effektive Temperatur der Sonne ist T = $(round(T, digits=2)) K.
""")
```

Die effektive Temperatur der Sonne ist $T = 5769.17$ K.

Die Temperatur, die ein gleich großer schwarzer Strahler haben müsste, um die gleiche Strahlung abzugeben, beträgt also etwa 5770 K.

5.2 Treibhausgase

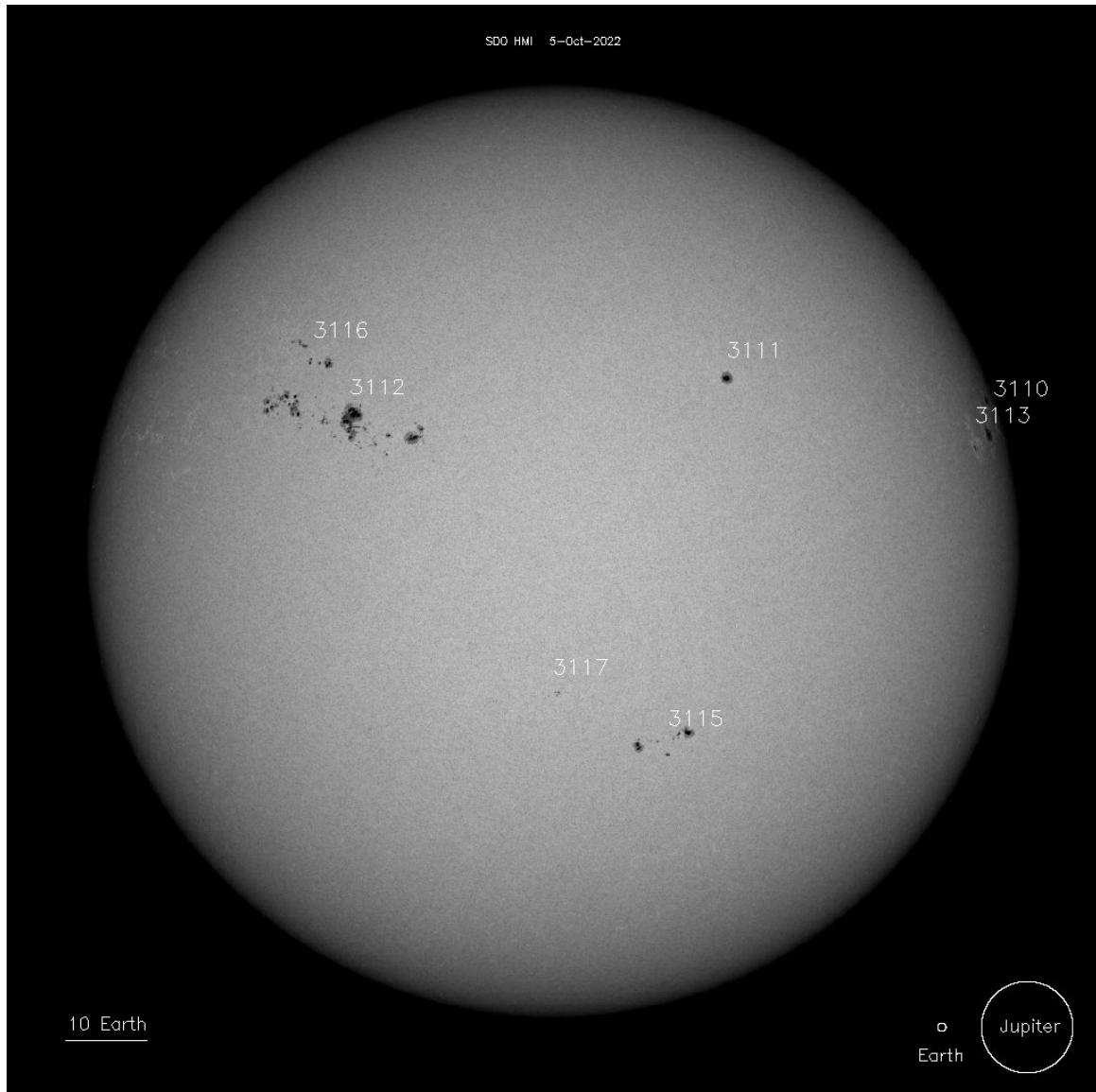
6 Sonnenflecken

Sonnenflecken sind dunkle Stellen auf der Sonnenoberfläche. Sie sind kühler und strahlen weniger sichtbares Licht ab als der Rest der Sonnenoberfläche.

Sonnenflecken bilden das einfachste Maß für die Sonnenaktivität.

Die Häufigkeit der Sonnenflecken unterliegt einer Periodizität von durchschnittlich 11 Jahren.

Ursache der Sonnenflecken sind starke Magnetfelder, welche den Wärmetransport an die Sonnenoberfläche behindern.



Die Häufigkeit der Sonnenflecken wird durch die Relativzahl erfasst.

man zählt die Einzelflecken (Zahl f) und addiert dazu das Zehnfache der Gruppenanzahl (Zahl g).

Die Sonnenfleckenrelativzahl ist eine Maßzahl der Sonnenaktivität und berechnet sich aus

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

wobei k ein vom Beobachter und seinen Instrumenten abhängiger Korrekturfaktor ist.

6.1 Aufzeichnungen der Sonnenfleckenrelativzahl

Zuständig für die Berechnung, Speicherung und Verbreitung der Sonnenfleckenrelativzahl ist das [Solar Influences Data analysis Center \(SIDC\)](#).

