

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

- Modul 1:** Sonne - Stern unter Sternen
2015 April 15, 29, Mai 13
- Modul 2:** Aufbau und Entstehung des Sonnensystems,
Heliosphäre
2015 Mai 27, Juni 10, 24
- Modul 3:** Planetoide, Kometen, Kleine Körper
2015 tbd.
- Modul 4:** Innere Planeten: Merkur und Venus
2015 tbd.
- Modul 5:** Unsere Heimat: Erde und Mond
- Modul 6:** Roter Planet Mars – Zeit und Kalender
- Modul 7:** Jupiter und seine Monde
- Modul 8:** Saturn und die Faszination planetarer Monde
- Modul 9:** Gasriesen (Uranus, Neptun) und Zwergplaneten

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

- Modul 10:** Kuipergürtel und der Rand des Sonnensystems
- Modul 11:** Interstellare Materie
und die Entstehung von Sternen
- Modul 12:** Aufbau und Entwicklung der Sterne
und ihre Strahlung
- Modul 13:** Weiße Zwerge – Rote Riesen – Schwarze Löcher –
Endstadien der Sternentwicklung
- Modul 14:** Die Sonne als Stern in der Milchstraße
und Sonderfälle der Sternentwicklung
- Modul 15:** Milchstraße
- Modul 16:** Galaxien, Galaxienhaufen und die
großräumige Struktur des Kosmos
- Modul 17:** Radiogalaxien, Quasare und supermassive
Schwarze Löcher

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

- Modul 18: Dimensionen des Weltalls**
- Modul 19: Raum-Zeit-Kontinuum,
Dunkle Materie und Teilchen**
- Modul 20: Modelle des Kosmos**
- Modul 21: Entwicklungsphasen des Weltalls, Gesamtschau**

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modul 1:

Sonne – *Stern unter Sternen*

(Thema 1.4)

1.4 Die Sonne



1.4 Die Sonne

1.4.1 Stellung der Sonne in der Milchstraße

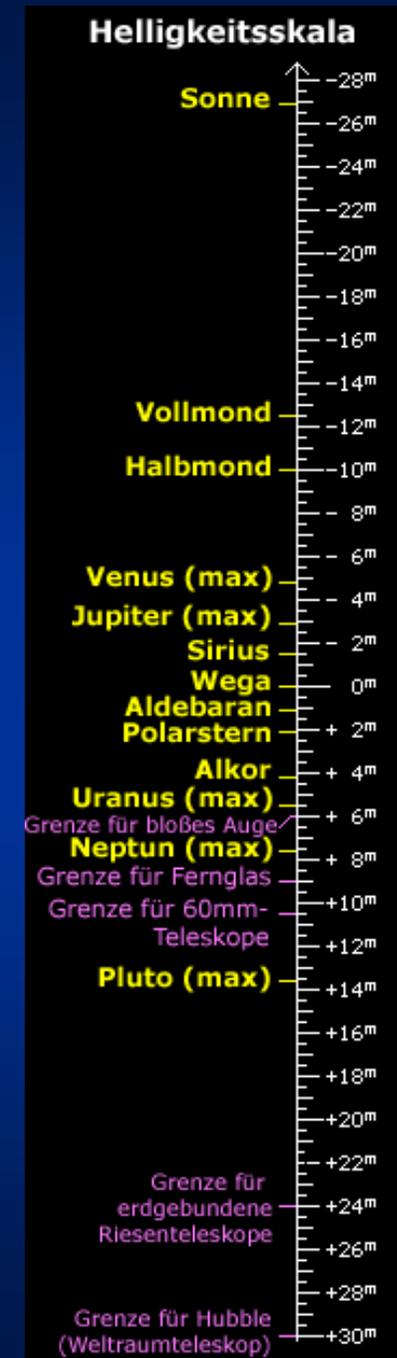
Die Sonne ist ein gelber Zwergstern vom Spektraltyp SpT = G2 V.

Sie ist das hellste Objekt am Himmel:

Sonne	-26.73 ^m
Vollmond	-12.73 ^m
Venus derzeit	-4.1 ^m
Jupiter derzeit	-2.5 ^m
Merkur derzeit	-1.8 ^m
Sirius (hellster Fixstern)	-1.46 ^m
Polarstern	+1.79 ^m

^m: Größenklasse (magnitudo)

$$m_1 - m_2 = -2.512 \log(I_1/I_2)$$



1.4 Die Sonne

1.4.1 Stellung der Sonne in der Milchstraße

Unter den 56 hellsten Sternen am Himmel, die mit bloßem Auge sichtbar sind, ist kein Hauptreihenstern vom Spektraltyp G.

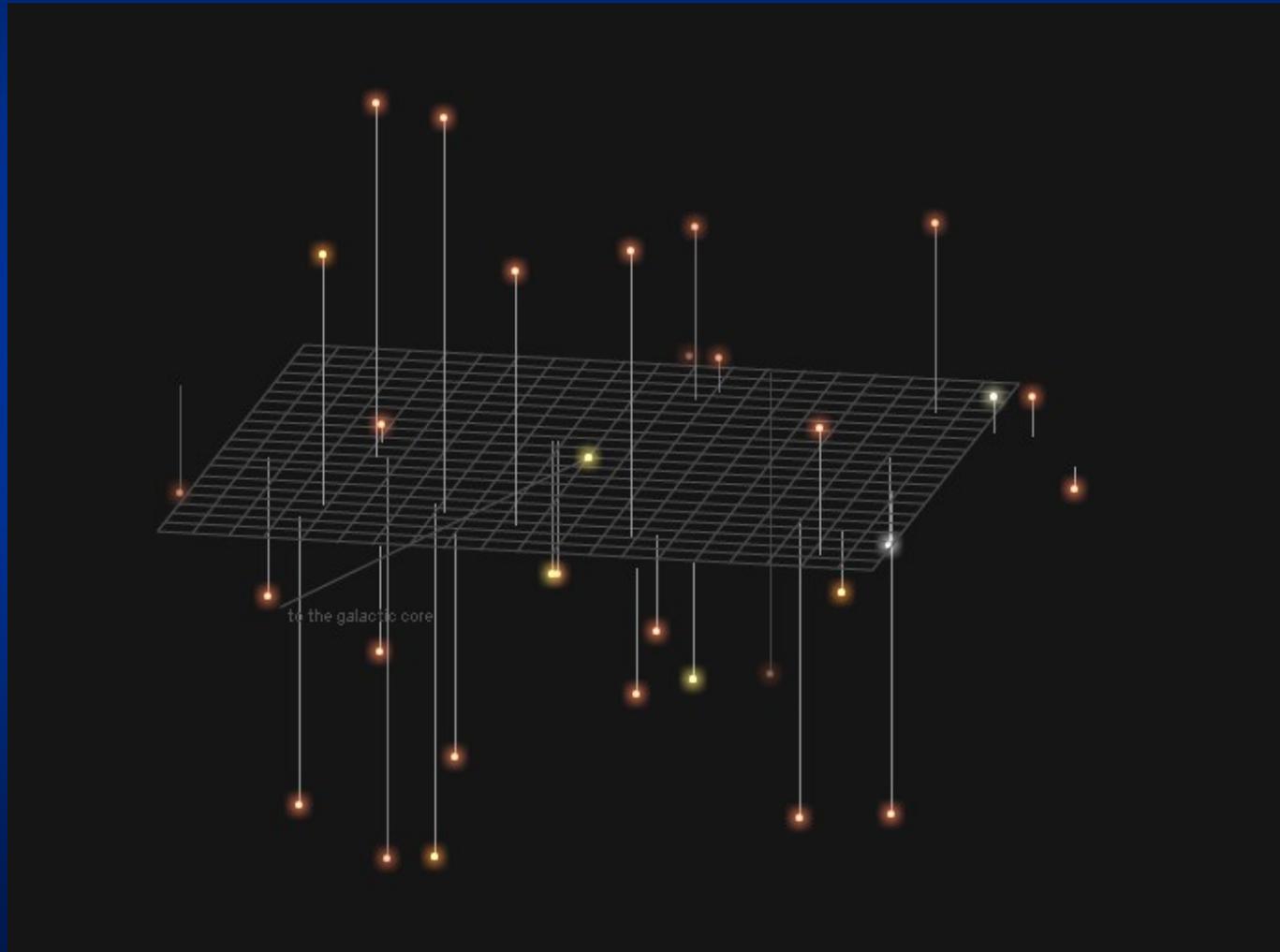
Unter den 26 nächsten Nachbarsternen der Sonne ist nur ein vergleichbarer, ihr nächster Nachbar α Cen A:

$$d = 4.3 \text{ Lj} \quad m_v = -0.3^m \quad \text{SpT} = \text{G2 V}$$

1.4 Die Sonne

1.4.1 Stellung der Sonne in der Milchstraße

Die 32 nächsten Nachbarsterne <14 Lj (von oben gesehen)

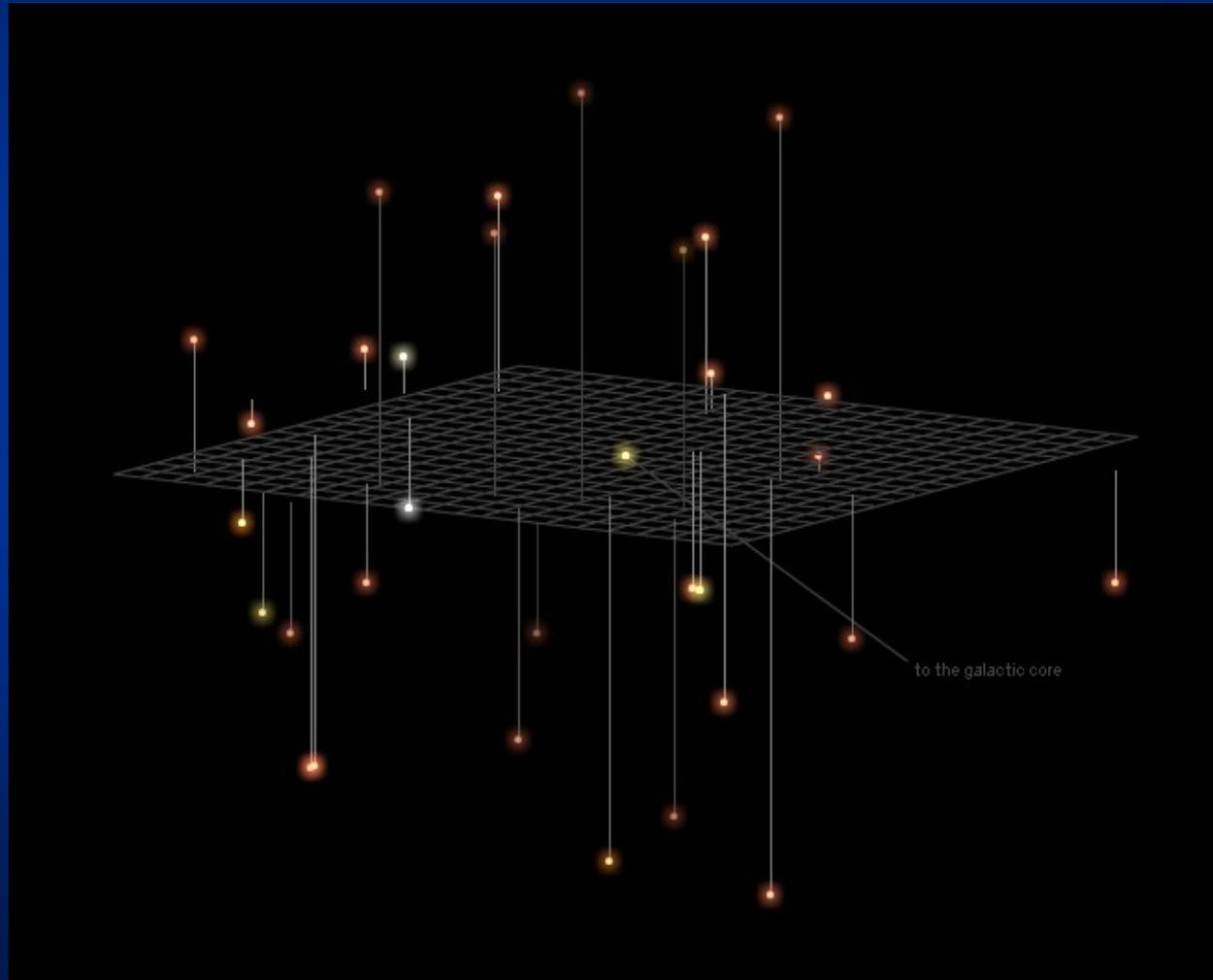


URL: <http://kisd.de/~krystian/starmap/>

1.4 Die Sonne

1.4.1 Stellung der Sonne in der Milchstraße

Die 32 nächsten Nachbarsterne <14 Lj (von unten gesehen)



URL: <http://kisd.de/~krystian/starmap/>

1.4 Die Sonne

1.4.1 Stellung der Sonne in der Milchstraße



1.4 Die Sonne

1.4.2 Die Sonne als Zentralstern des Sonnensystems

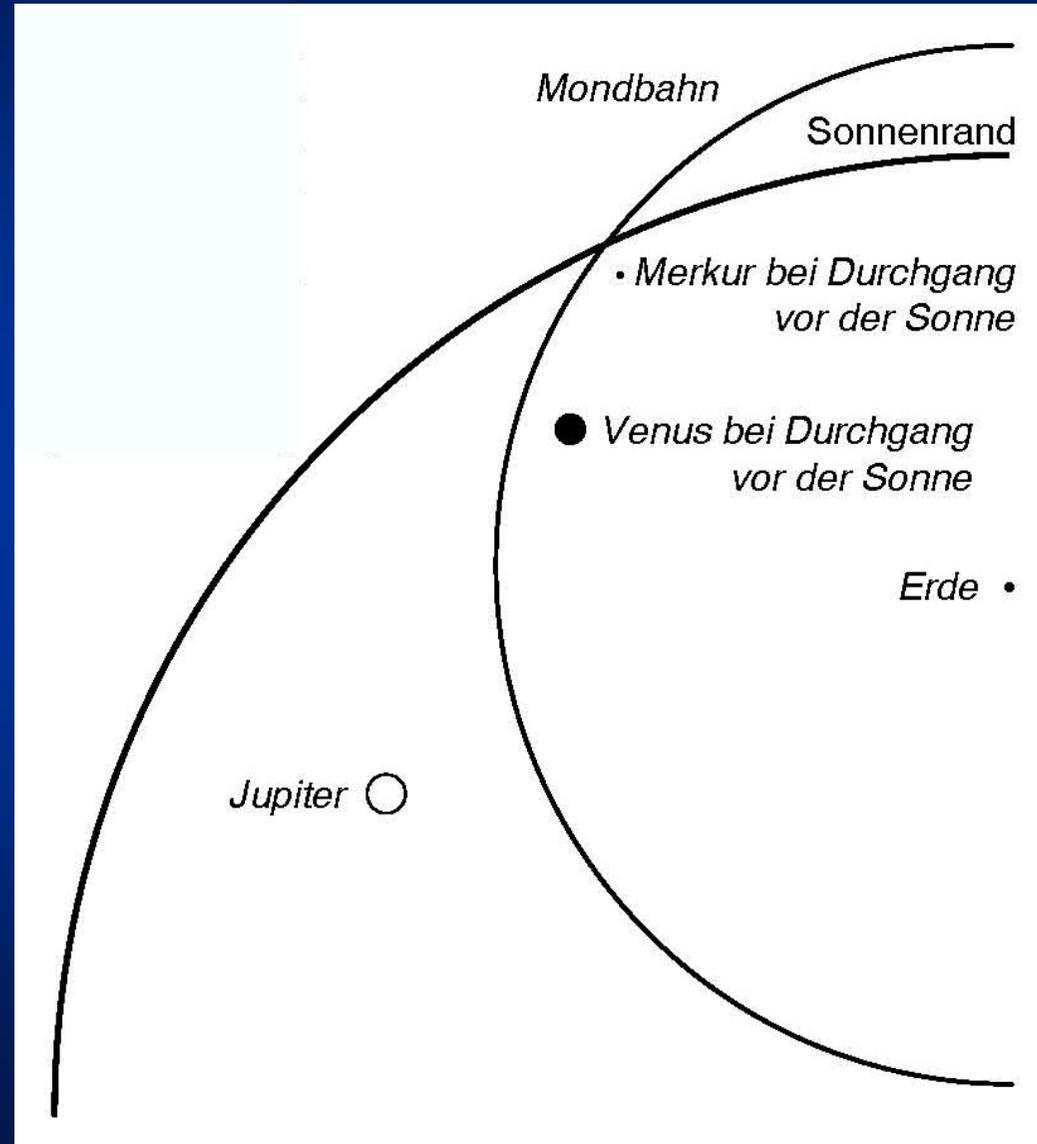
**Die Sonne enthält 99.865 % der Gesamtmasse des Sonnensystems,
jedoch nur 0.5 % des Drehimpulses.**

Der Drehimpuls wird bestimmt durch die Masse (Massenverteilung), die Größe und die Drehgeschwindigkeit eines Körpers und ist eine Information über die in seiner Drehung enthaltene Energie.

1.4 Die Sonne

1.4.3.1 Physische Daten

Größenverhältnisse:



1.4 Die Sonne

1.4.3.1 Physische Daten

Sonne als Stern:

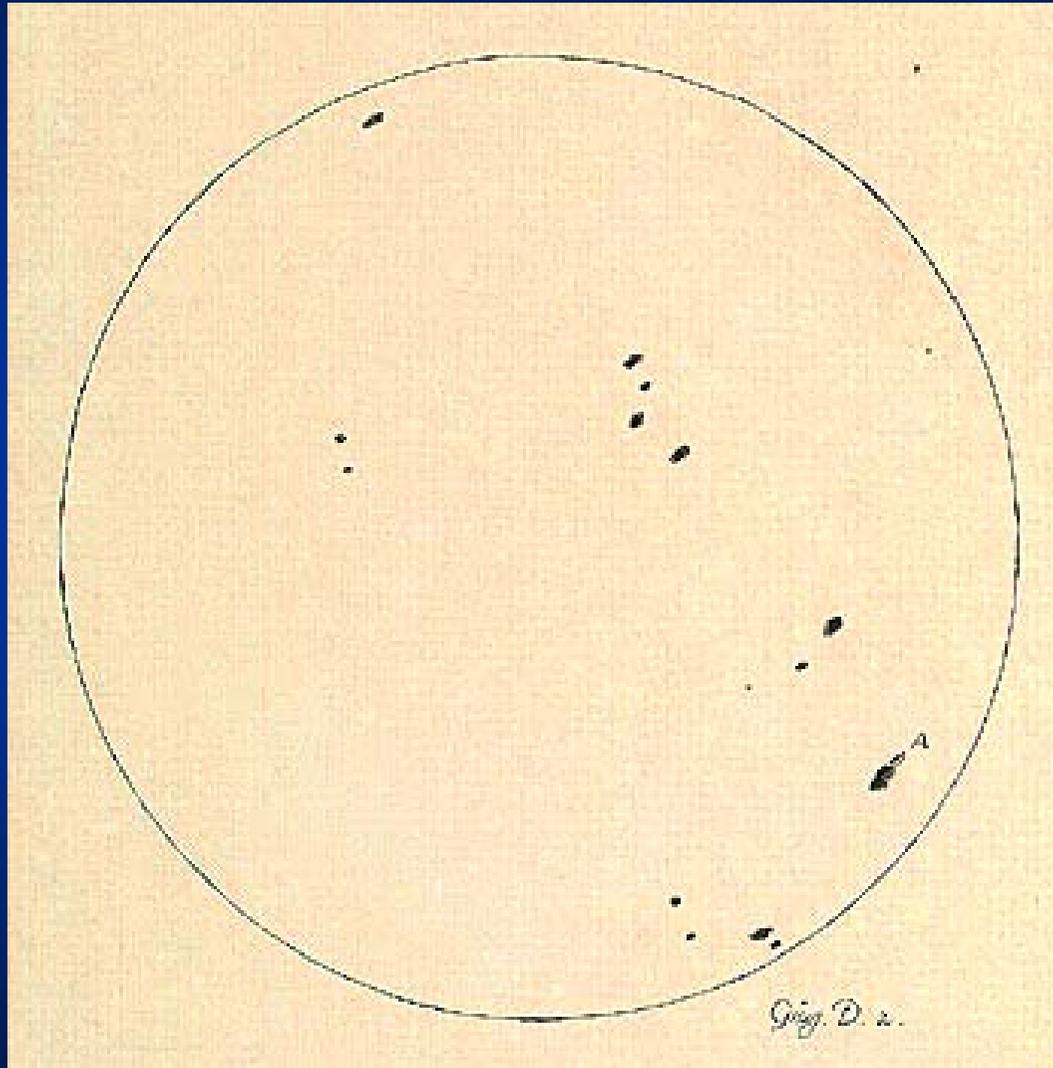
scheinbare Helligkeit:	m_v	-26.73 ^m			
absolute Helligkeit:	M_v	4.83 ^m			
Spektraltyp:	SpT	G2 V			
scheinbare Größe:	Erde im Aphel	31'27"	Entfernung:	152'100'000 km	Lichtzeit: 8 ^m 27 ^s
	Erde in 1 AE	31'59"		149'600'000 km	8 ^m 19 ^s
	Erde im Perihel	32'32"		147'100'000 km	8 ^m 10 ^s
Geschwindigkeit gegen die umgebenden Sterne:	v			19.4 km s ⁻¹	

Physische Daten:

Masse	M	$1.989 \cdot 10^{30}$ kg	332'950 Erdmassen
Volumen	V	$1.412 \cdot 10^{18}$ km ³	1'304'000 Erdvolumina
mittlere Dichte:	ρ	1.408 g cm ⁻³	25.5 % der mittl. Erddichte
Schwerebeschleunigung:	g	274 m s ⁻²	28-fache Erdbeschleunigung
Radius:	R	696'000 km	109.2 Erdradien

1.4 Die Sonne

1.4.3.2 Rotation



Schon Galileo Galilei sah die Rotation der Sonne mit ihren Flecken! (Aus „Istoria“, 1613)

1.4 Die Sonne

1.4.3.2 Rotation



Die Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper, sondern differentiell.

1.4 Die Sonne

1.4.3.2 Rotation

siderische Rotation (bei 16° Breite):	25 ^d 09 ^h 07 ^m
synodische Rotation ("):	27 ^d 06 ^h 31 ^m
Achsenneigung gegen Ekliptik:	7° 15'

Die Sonnerotation variiert breitenabhängig zwischen etwa 24 Tagen (Äquator) und 31 Tagen (hohe Breiten).

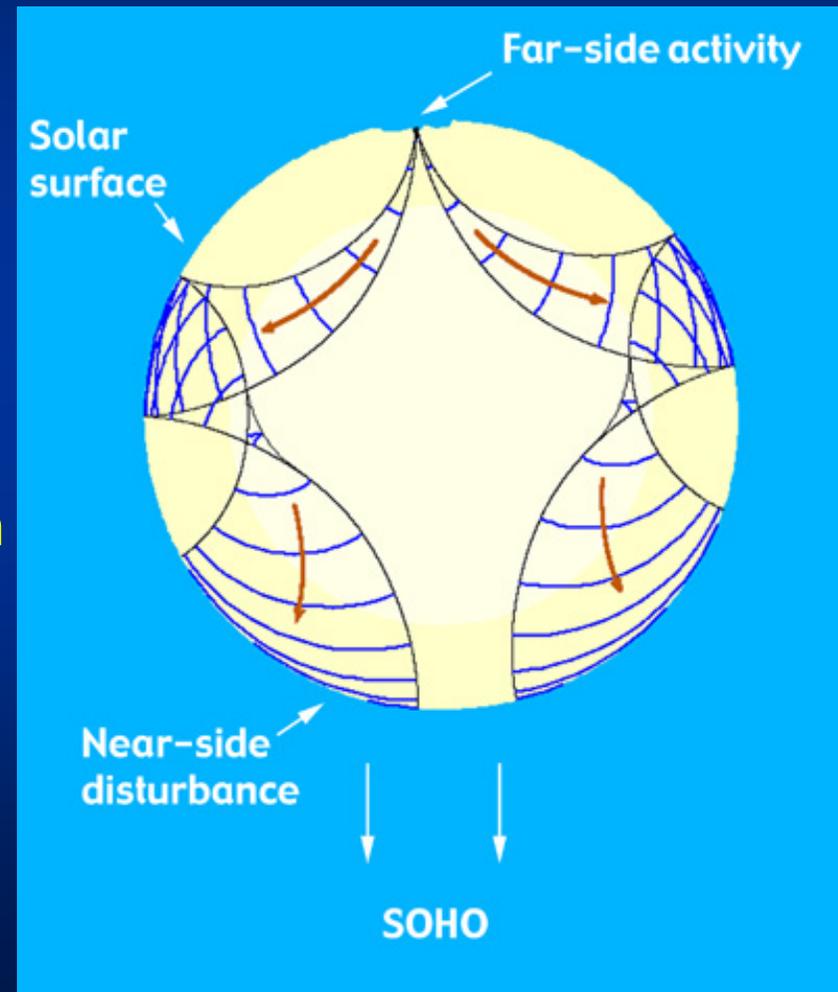
1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Helioseismologie

Abgeleitet aus der Methode der Untersuchung des Erdkörpers durch Erdbebenwellen können mit Hilfe der kleinräumigen spektroskopischen Untersuchung der Schwingungsmuster und Oszillationen der Photosphäre Informationen über die Strömungen in der Konvektionszone und auch über anregende Mechanismen (Aktivitätszonen) auf der Rückseite der Sonne gewonnen werden.

(Quelle: NASA & esa)



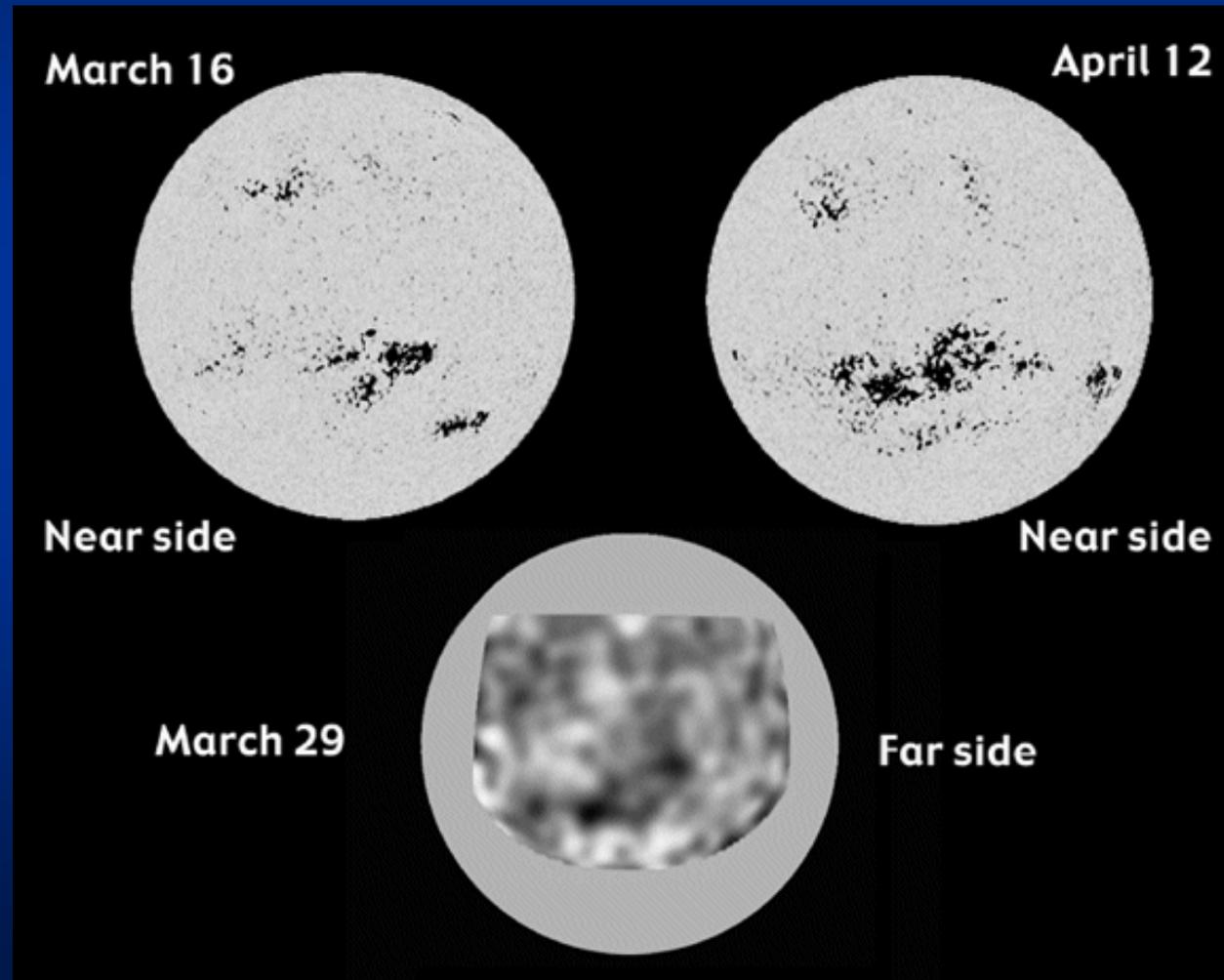
1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Helioseismologie

Beobachtung einer Aktivitätszone über eine ganze Sonnenrotation hinweg.

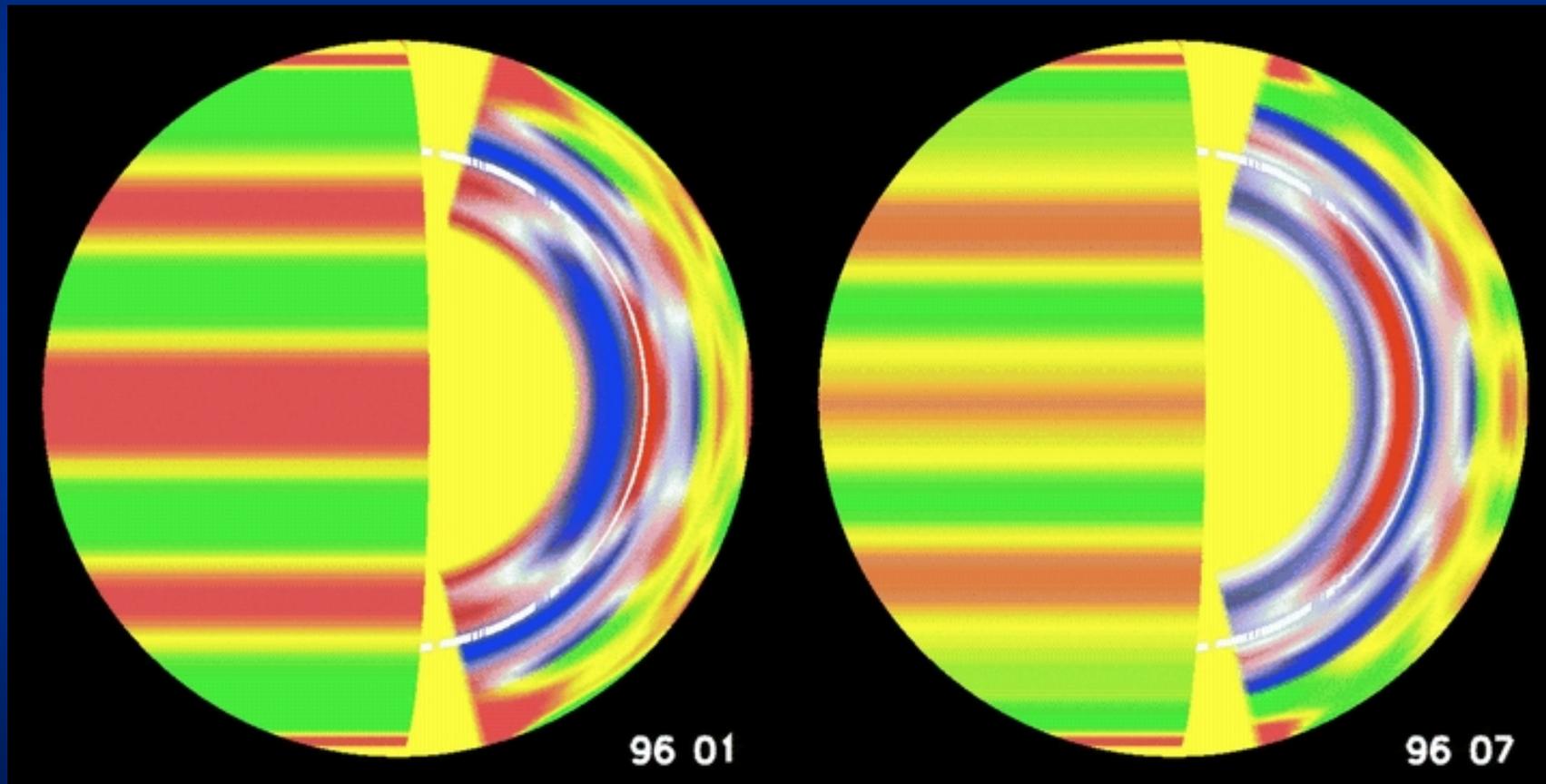
(Quelle: NASA & esa)



1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Nord-Süd-Strömungsmuster in der Konvektionszone

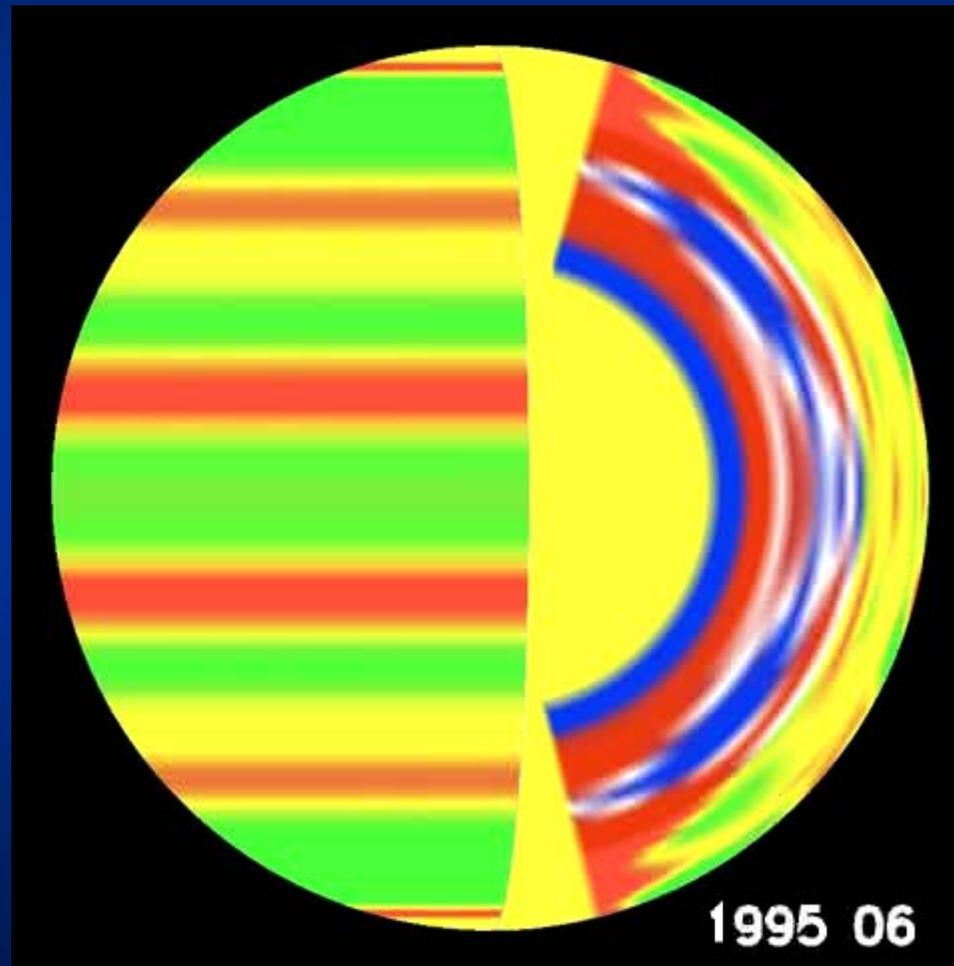


(Quelle: GONG (NSO/NSF) und SOHO/MDI (esa & NASA))

1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Nord-Süd-Strömungsmuster in der Konvektionszone

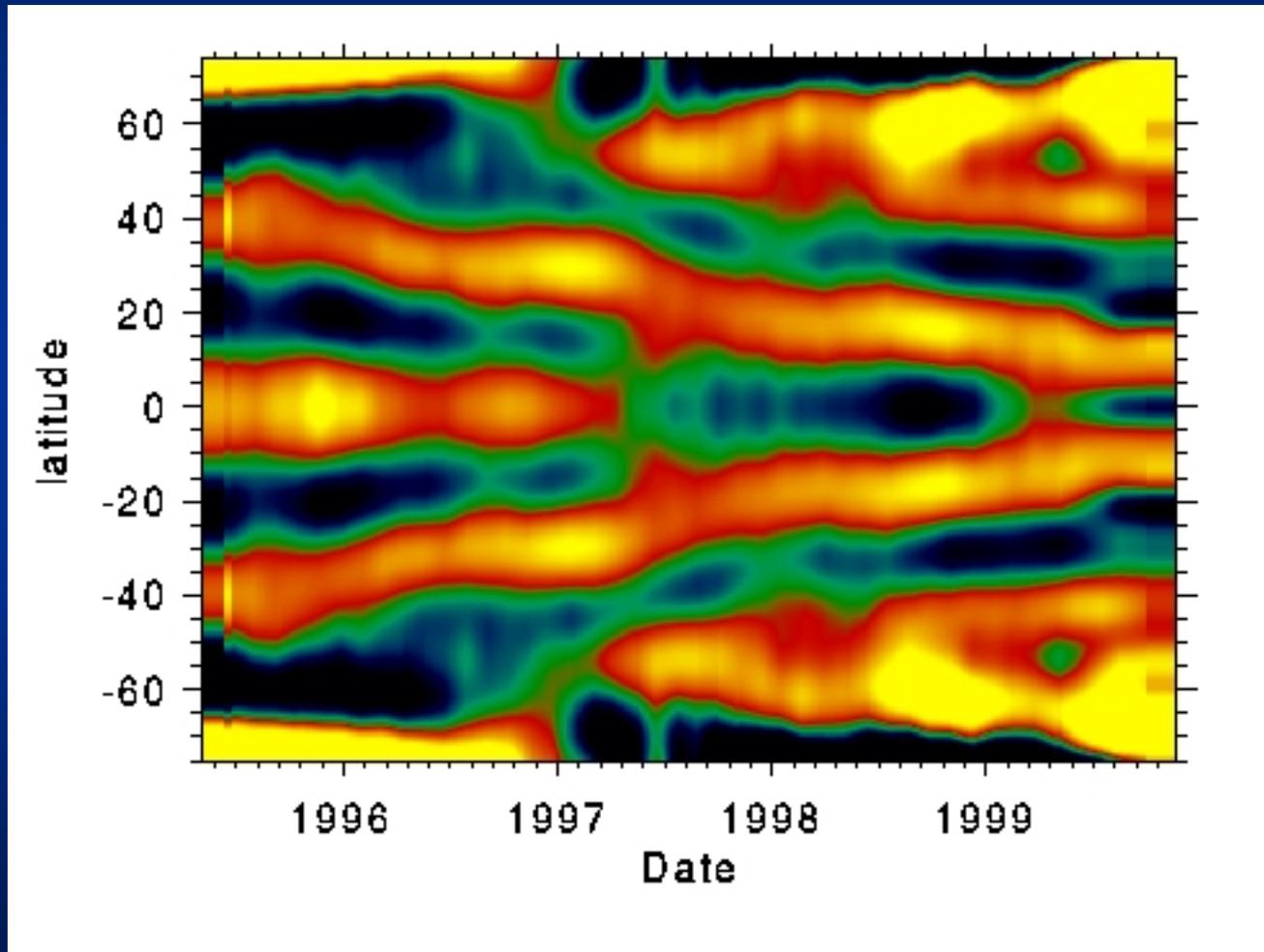


(Quelle: GONG (NSO/NSF) und SOHO/MDI (esa & NASA))

1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Ost-West-Strömungsmuster in der Photosphäre

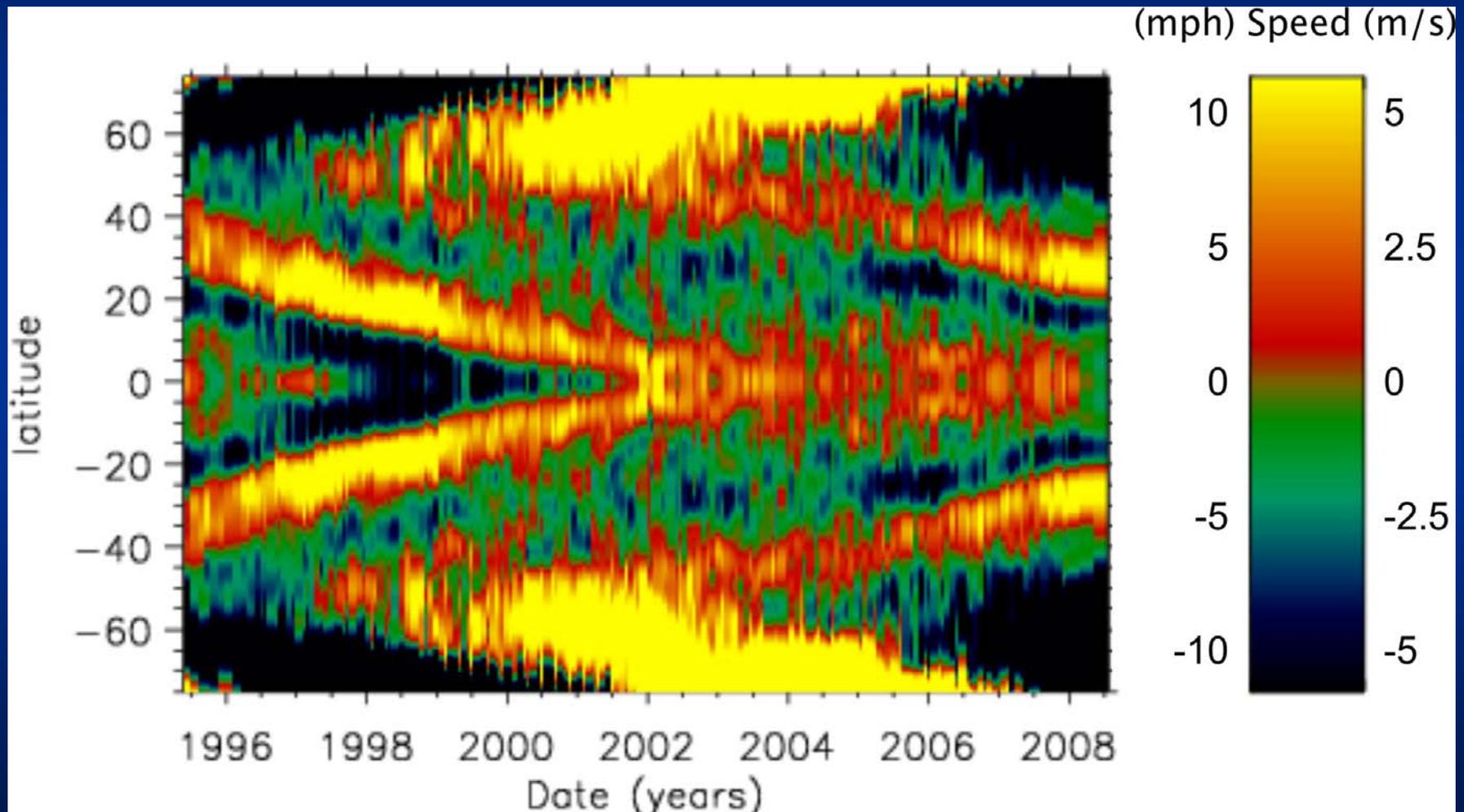


(Quelle: Southwest Research Institute, Boulder)

1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

Ost-West-Strömungsmuster in der Photosphäre

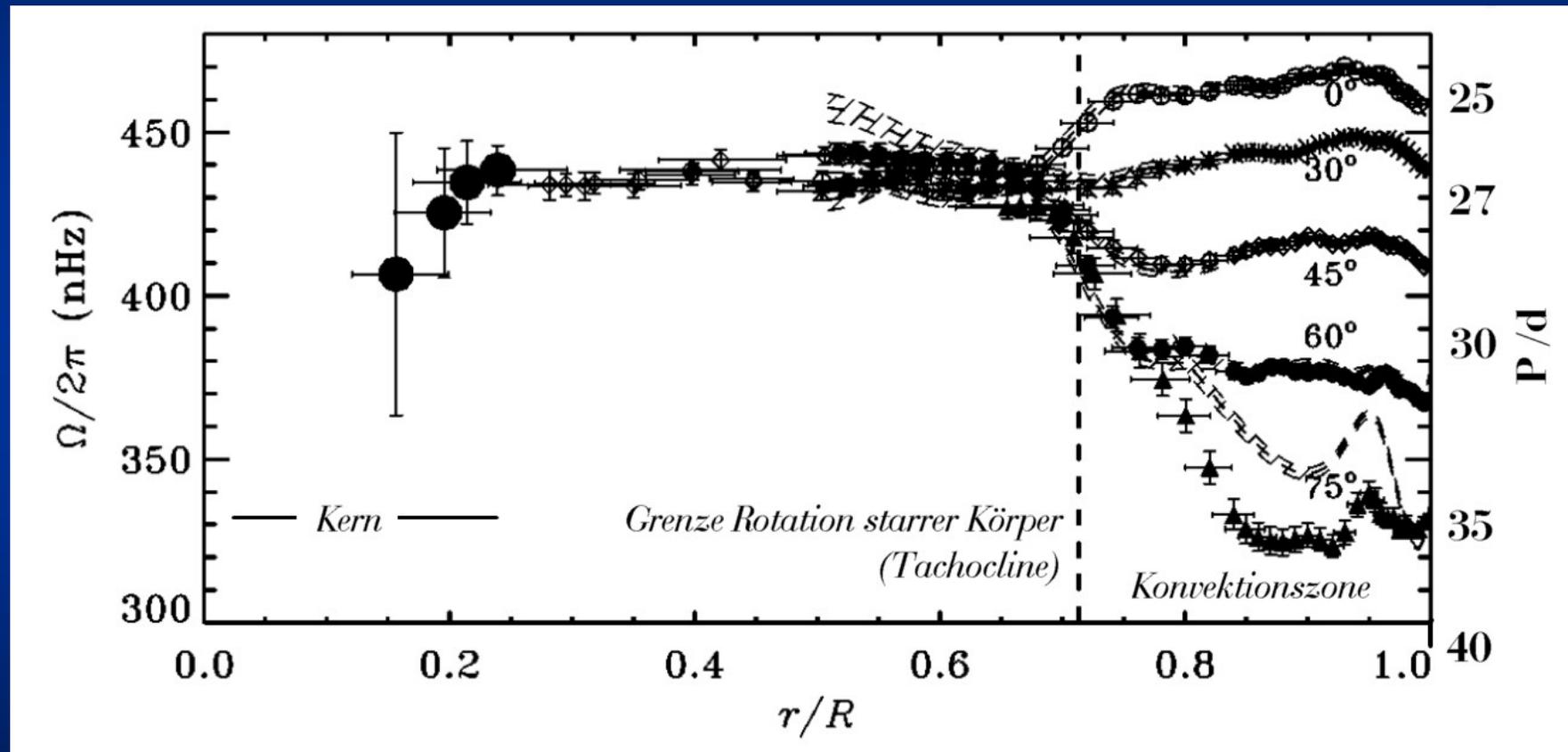


(Quelle: Southwest Research Institute, Boulder)

1.4 Die Sonne

1.4.3.3 Strömungen und Tiefenrotation

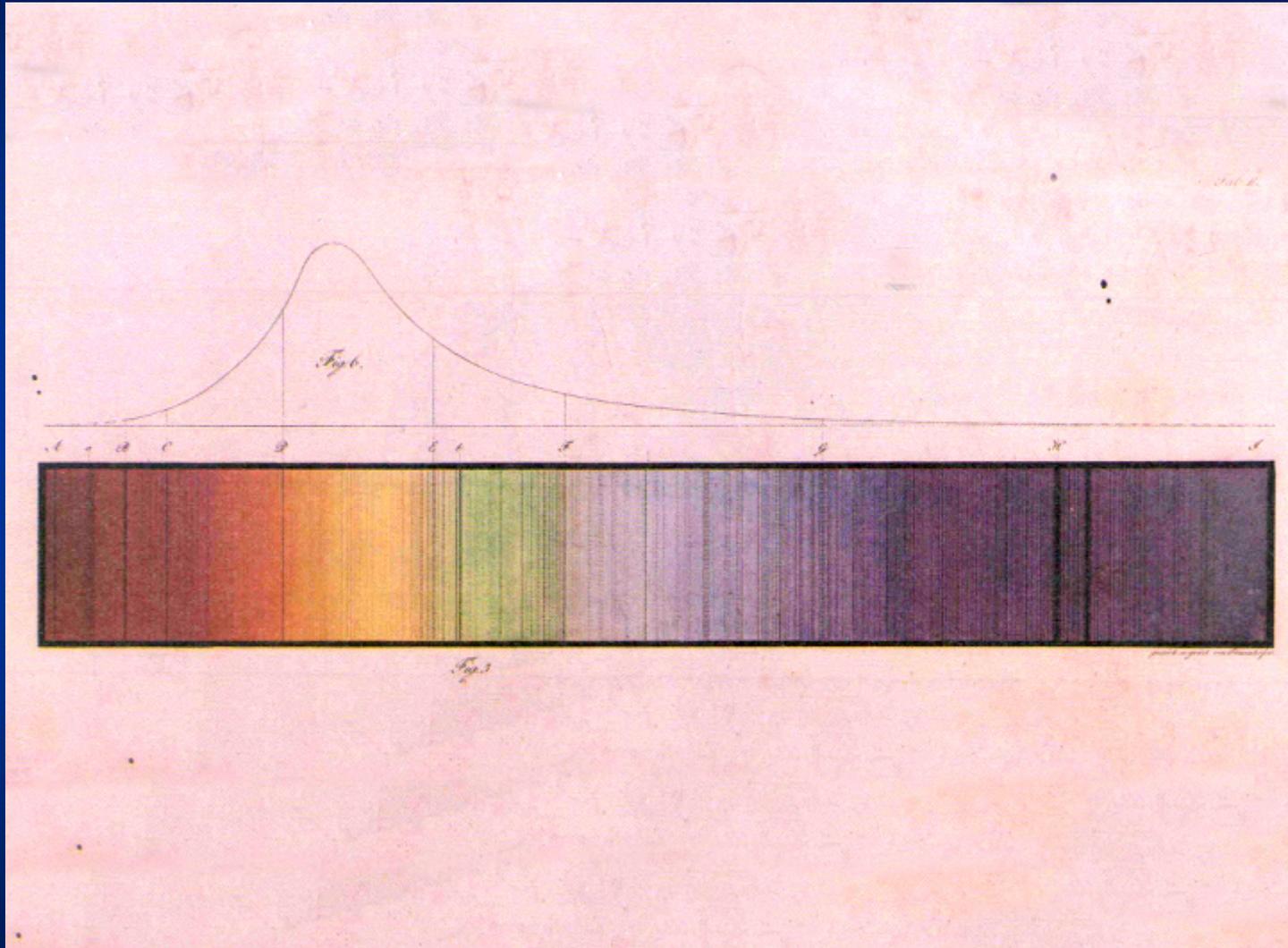
Tiefenrotation in der Konvektionszone



(Quelle: *The Dynamics and Kinematics of Coronal Mass Ejections and Shock Waves*. Eoin P. Carley (2013)
Textergänzung: Dr. Jürgen Wirth (2015))

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Das solare Strahlungsspektrum

(Original von Joseph von Fraunhofer gezeichnet und koloriert)

1.4 Die Sonne

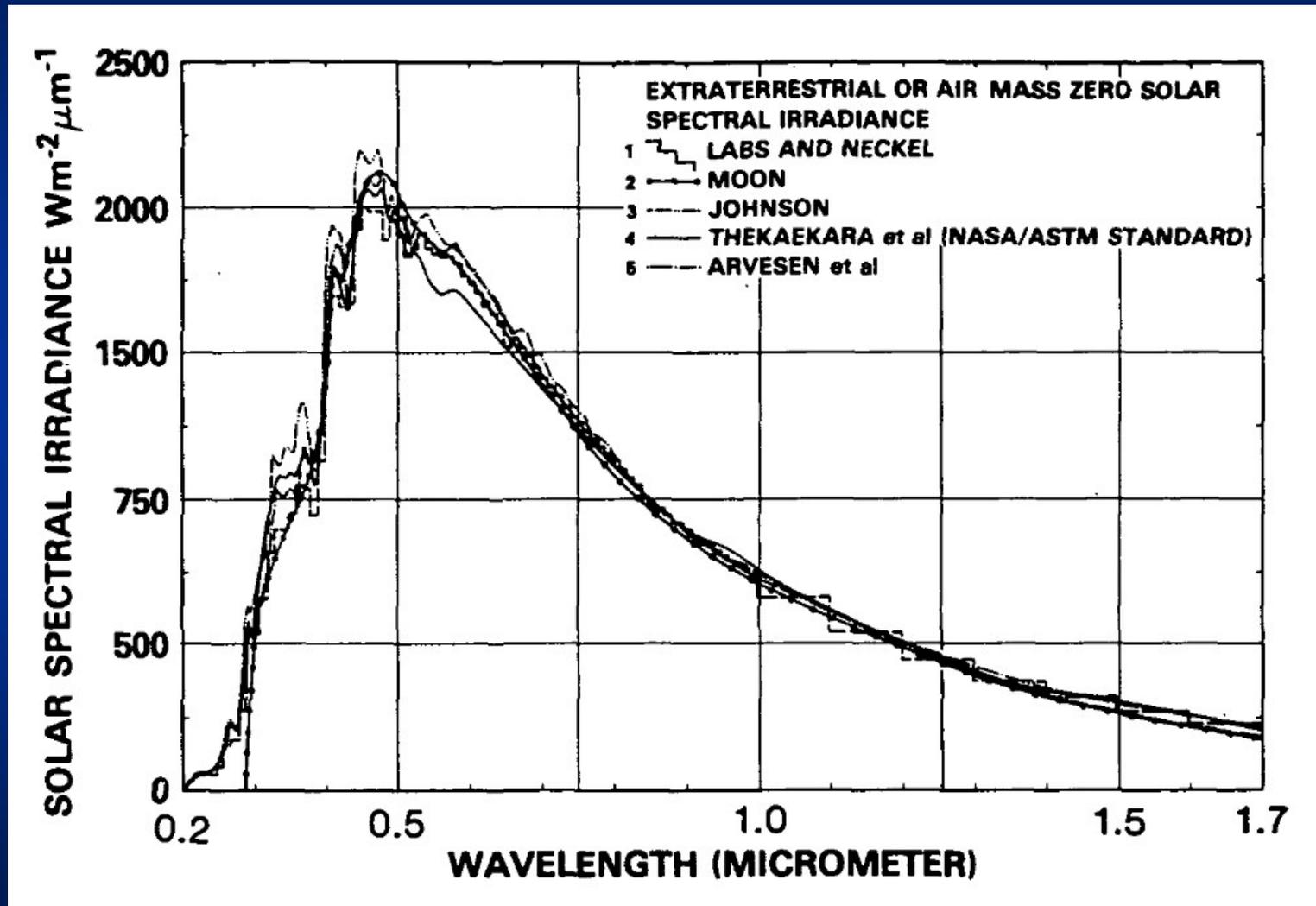
1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Joseph von Fraunhofer (1787–1826)

1.4 Die Sonne

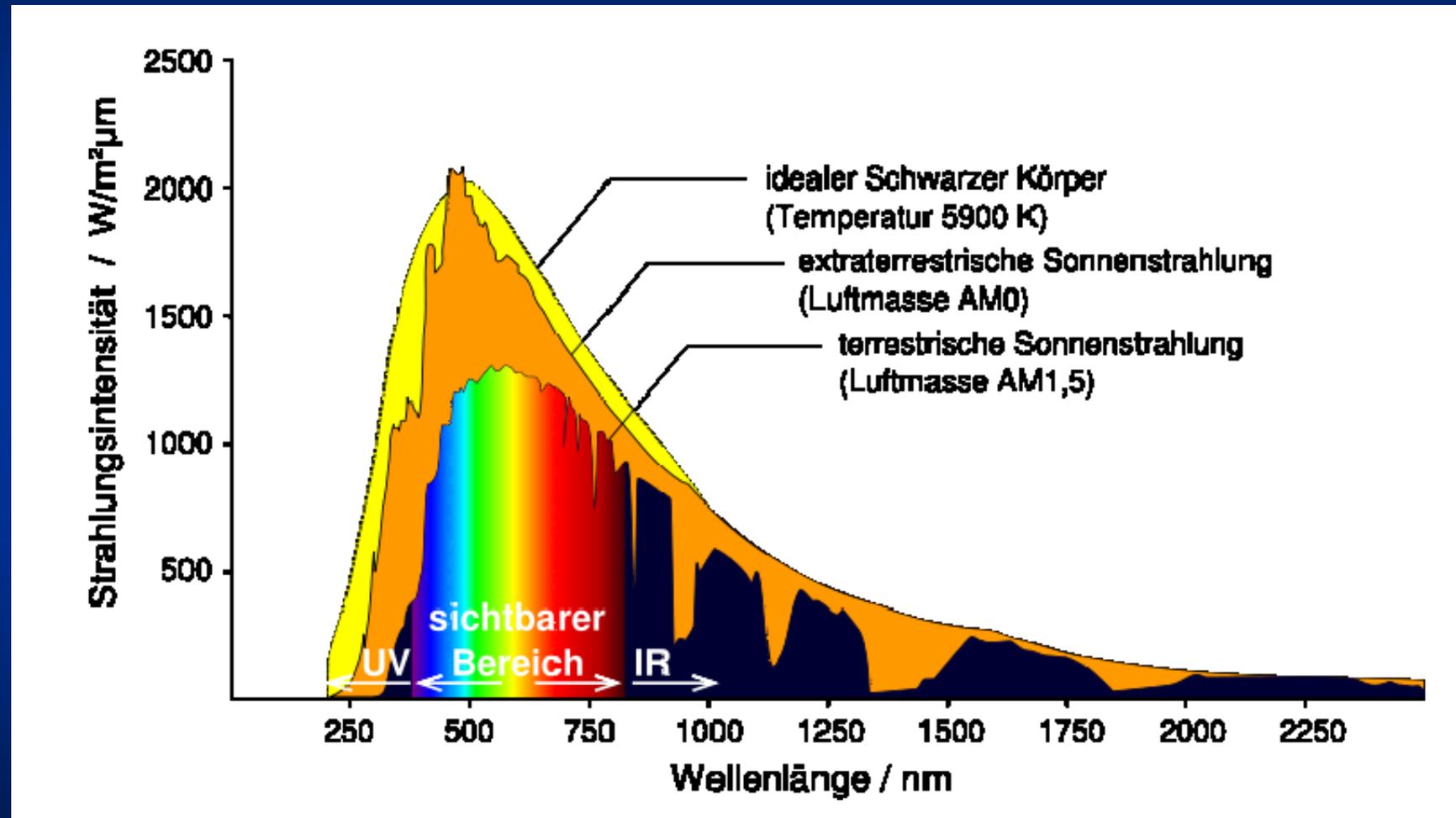
1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Das solare Strahlungsspektrum (extraterrestrisch)

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Das solare Strahlungsspektrum (schematisch)

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Unter thermischen Bedingungen entsteht ein Strahlungsspektrum, das dem Planckschen Strahlungsgesetz folgt:

$$E_{\lambda}(T) = \frac{4\pi hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)^{-1}$$

Ein Strahler, der diesem Gesetz genau folgt, ist ein „Schwarzer Strahler“ oder „Schwarzer Körper“.

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Entstehung eines Planck-Spektrums

Energie wird von Atomen abgegeben durch die Abstrahlung atomarer Emissionslinien. Diese sind energetisch scharf definiert. Trotzdem sind sie in der Realität verbreitert, auch in Absorption:

1. durch die quantentheoretische Unschärfe
2. wegen der Dopplerverbreiterung durch die Bewegung entlang der Sichtlinie (Temperaturverbreiterung)
3. durch Beeinflussung und Veränderung der Energieniveaus bei Annäherung und Stößen der Atome in einem dichten Gas (Druckverbreiterung)
4. Durch Aufspaltung durch elektrische und magnetische Felder (Stark-Effekt und Zeeman-Effekt).

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Entstehung eines Planck-Spektrums

Ein kontinuierliches Strahlungsspektrum nach Planck entsteht, wenn im Gas aufgrund des Drucks / der Dichte ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTE) existiert, in dem alle Photonen vielfach absorbiert und re-emittiert werden, bevor sie das Gas verlassen können. Das ist in der Photosphäre der Sonne der Fall.

1.4 Die Sonne

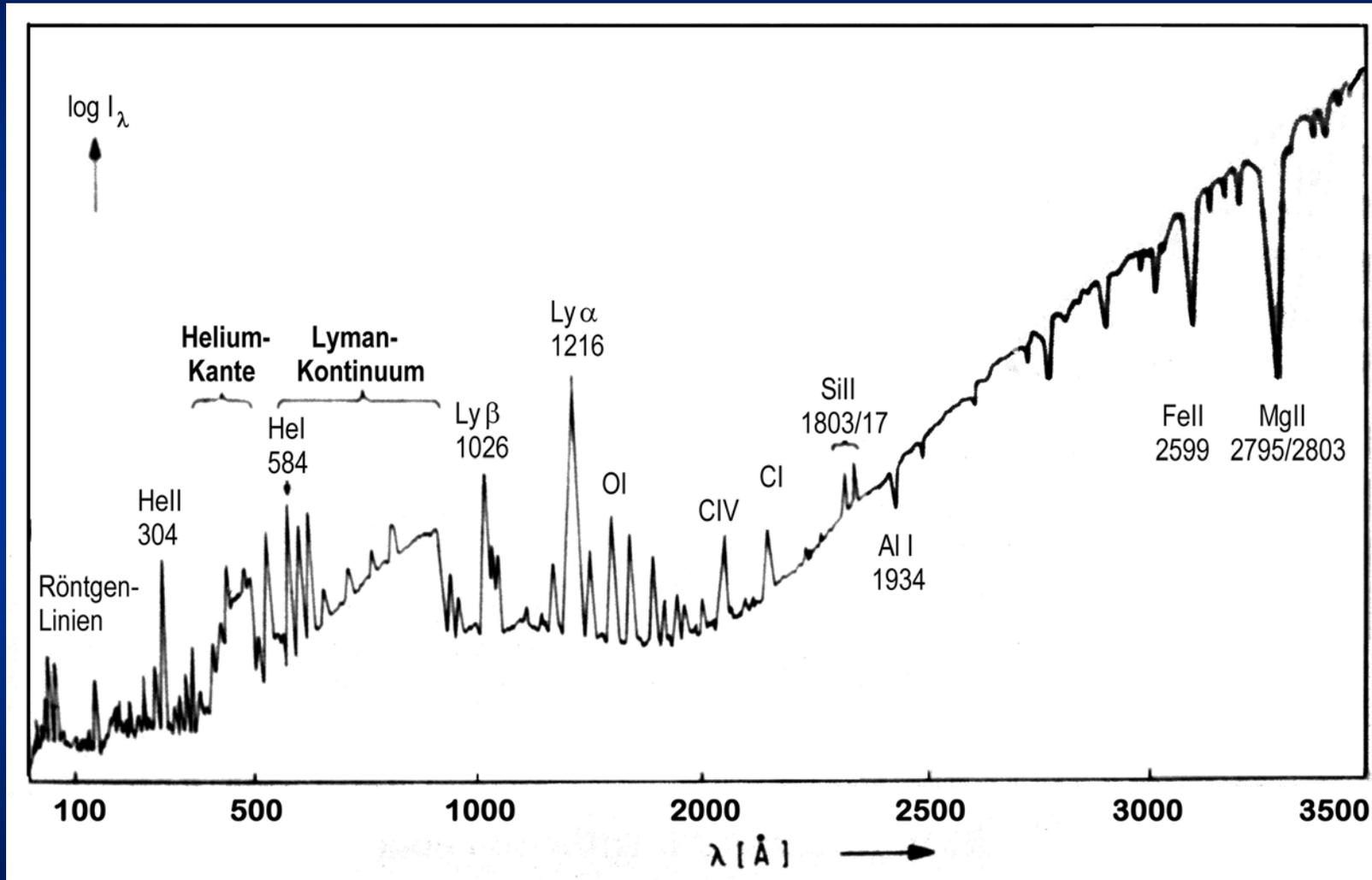
1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Die Kirchhoffschen Gesetze

1. **Gase unter hohem Druck und Festkörper erzeugen bei hoher Temperatur ein kontinuierliches Spektrum.**
2. **Heiße Gase geringer Dichte erzeugen ein Emissionslinienspektrum, das eventuell mit einem (schwachen) Kontinuum unterlegt ist.**
3. **Ein kontinuierliches Spektrum wird nach dem Durchgang durch ein Gas geringer Dichte Absorptionslinien aufweisen.**

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Am kurzwelligeren Ende geht das Spektrum der Sonne aus einem Absorptionlinienspektrum in ein Emissionslinienspektrum über.

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

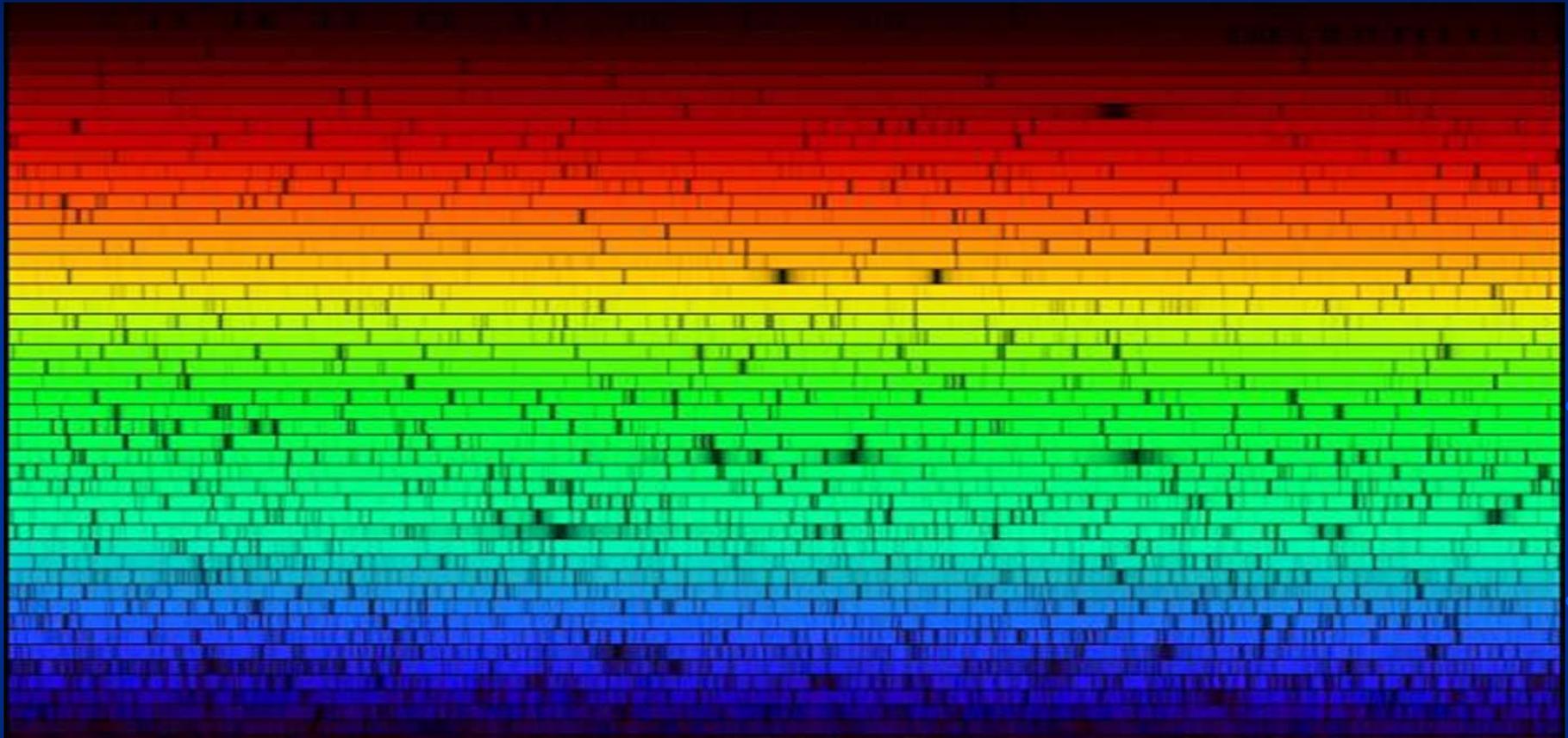


Name	Wellenlänge	Ursprung	Name	Wellenlänge	Ursprung
A	7594	O ₂	E	5270	Fe 1
a	7165	H ₂ O	b	5170, 5180	Mg 1
B	6867	O ₂	F	4861	Hβ
C	6563	Hα	G	4300	C H
D	5890, 5896	Na 1	H	3968	Ca 2

Die Spektrallinien der Sonne (Fraunhofer 1814)

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



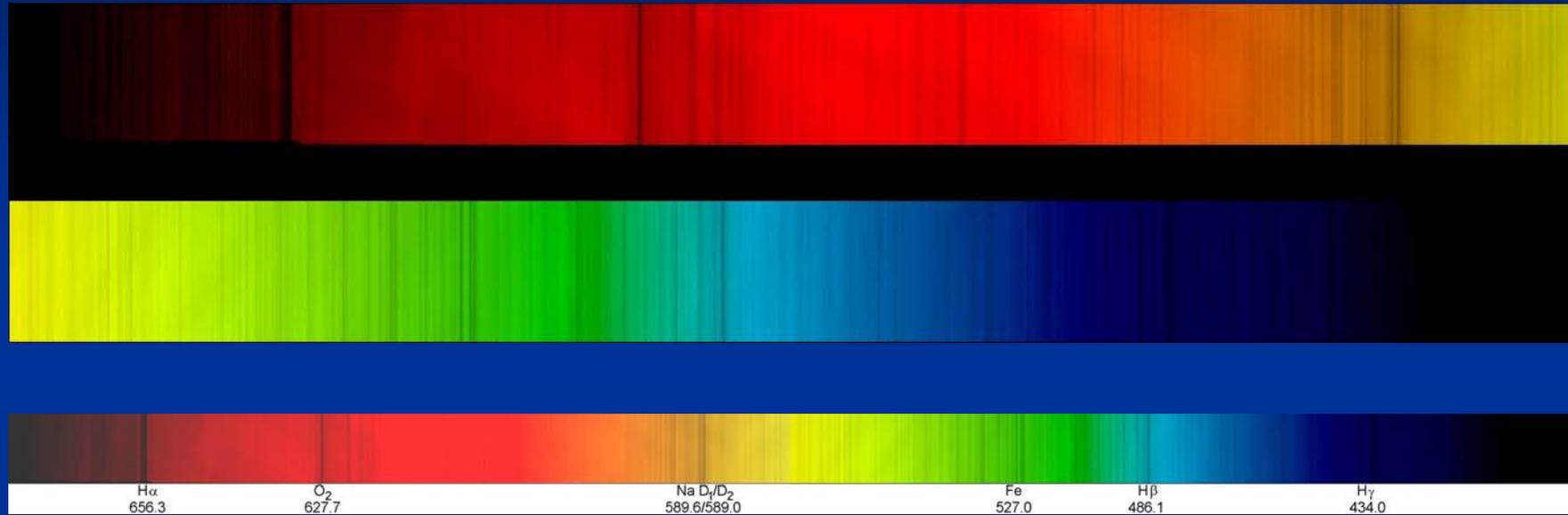
„Aktuelle Astronomie – Einführungskurs“ von Dr. Jürgen Wirth © 2015

**Die Spektrallinien der Sonne (Fraunhofer-Linien):
Das komplette Sonnenspektrum im sichtbaren Licht, zerschnitten in
Streifen, beginnend oben links am roten Ende,
endend unten rechts im UV.**

Quelle: NASA

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



„Aktuelle Astronomie – Einführungskurs“ von Dr. Jürgen Wirth © 2015

Die Spektrallinien der Sonne (etwas kompakter)

Quelle: U. Zlender, 2007

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Elements Found in the Sun

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha																	

Legend:

- observed in photosphere (yellow)
- only in spots (orange)
- only in chromosphere (red)
- only in corona (pink)
- ⁴³Tc elements with no stable isotopes (blue)

Lanthanide series:

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Actinide series:

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

68 Elemente, die an Hand der Spektrallinien gefunden wurden.

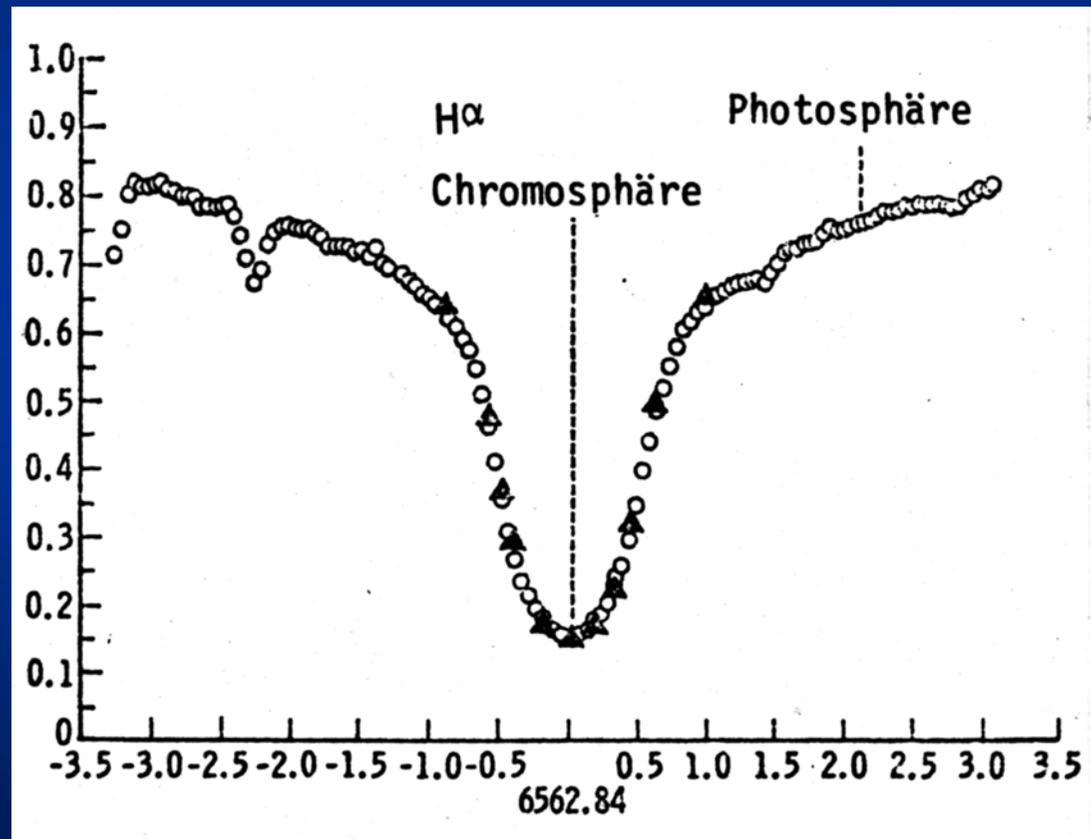
Die 24 weiteren natürlichen Elemente sind entweder radioaktiv instabil (10) oder selten und haben zu schwache oder überblendete Linien (14). Weiterhin sind die Linien der Moleküle CH, OH, NH, O₂ und CO zu finden.

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Absorptionslinienprofil

H α

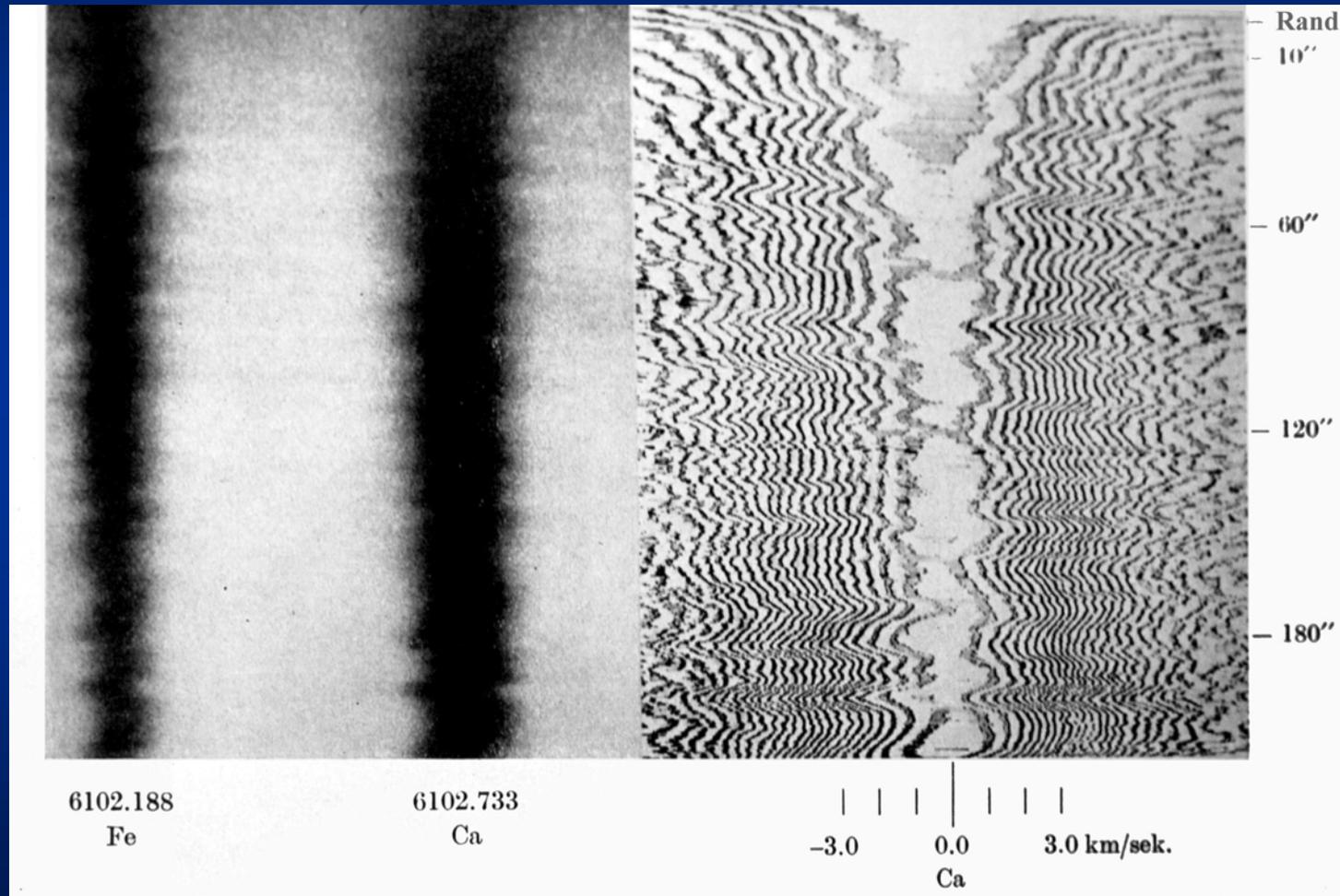


Die Einsenkung auf der kurzwelligen Seite ist eine Si-Absorption.

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Absorptionslinienprofil



Fluktuation von Linienprofilen aufgrund von Einflüssen von Temperatur und Turbulenz.

1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum

Solarkonstante

Landläufig wird die Strahlung der Sonne als konstant angesehen. Daher kommt auch der Begriff „Solarkonstante“, die nach einer Festlegung der WMO aus dem Jahr 1982 mit

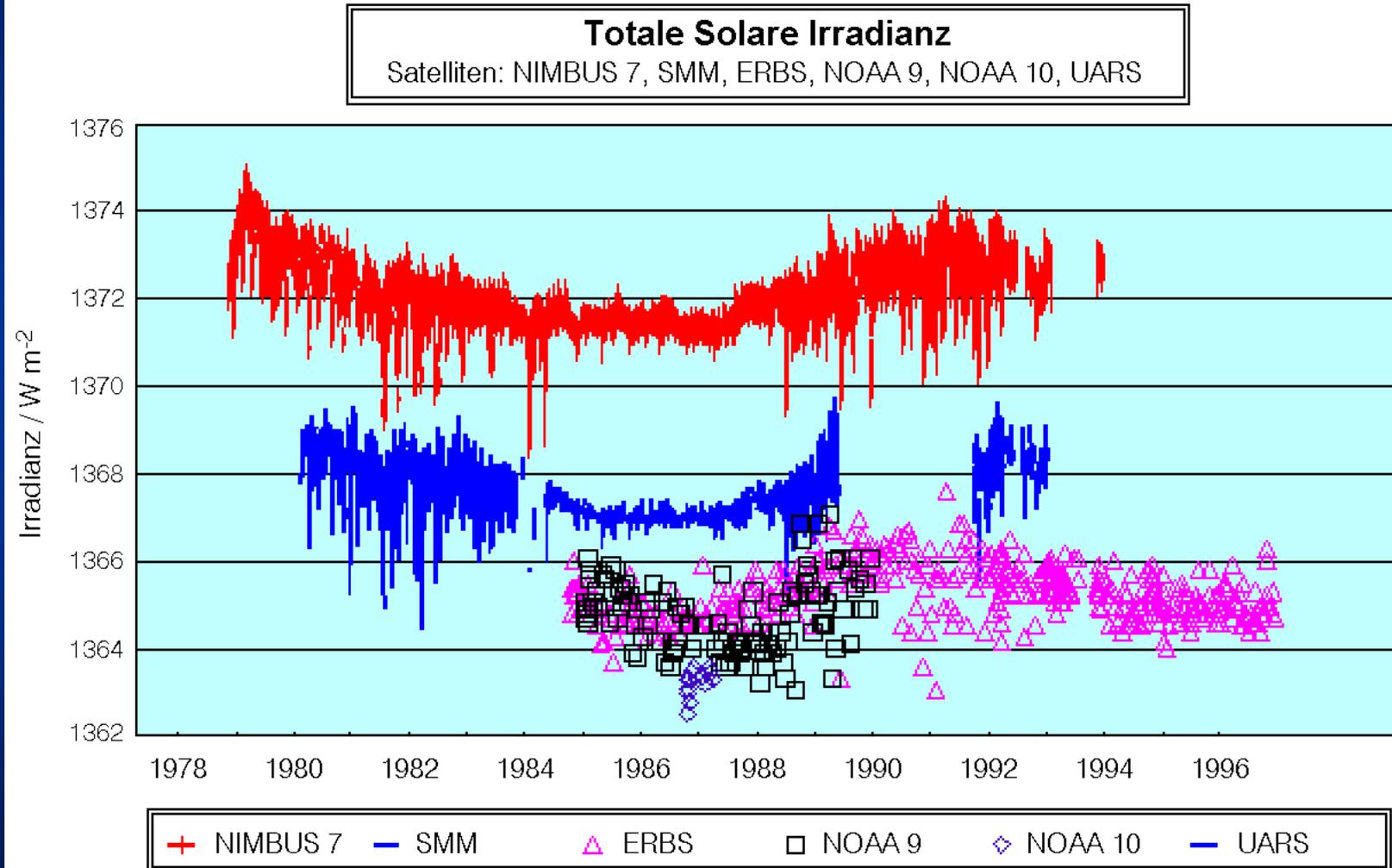
$$E_0 = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

angeben wird. Sie schwankt aufgrund der Exzentrizität der Erdbahn jahreszeitlich zwischen 1'325 und 1'420 (-3.3/+3.4%).

Tatsächlich gibt es kleine langfristige Variationen ($\pm 0.1\%$) und einen Trend zur langsamen Steigerung der Strahlung (Erwärmung der Sonne im Laufe ihrer Sternentwicklung) mit $+1\%$ pro 100 Mio. Jahre.

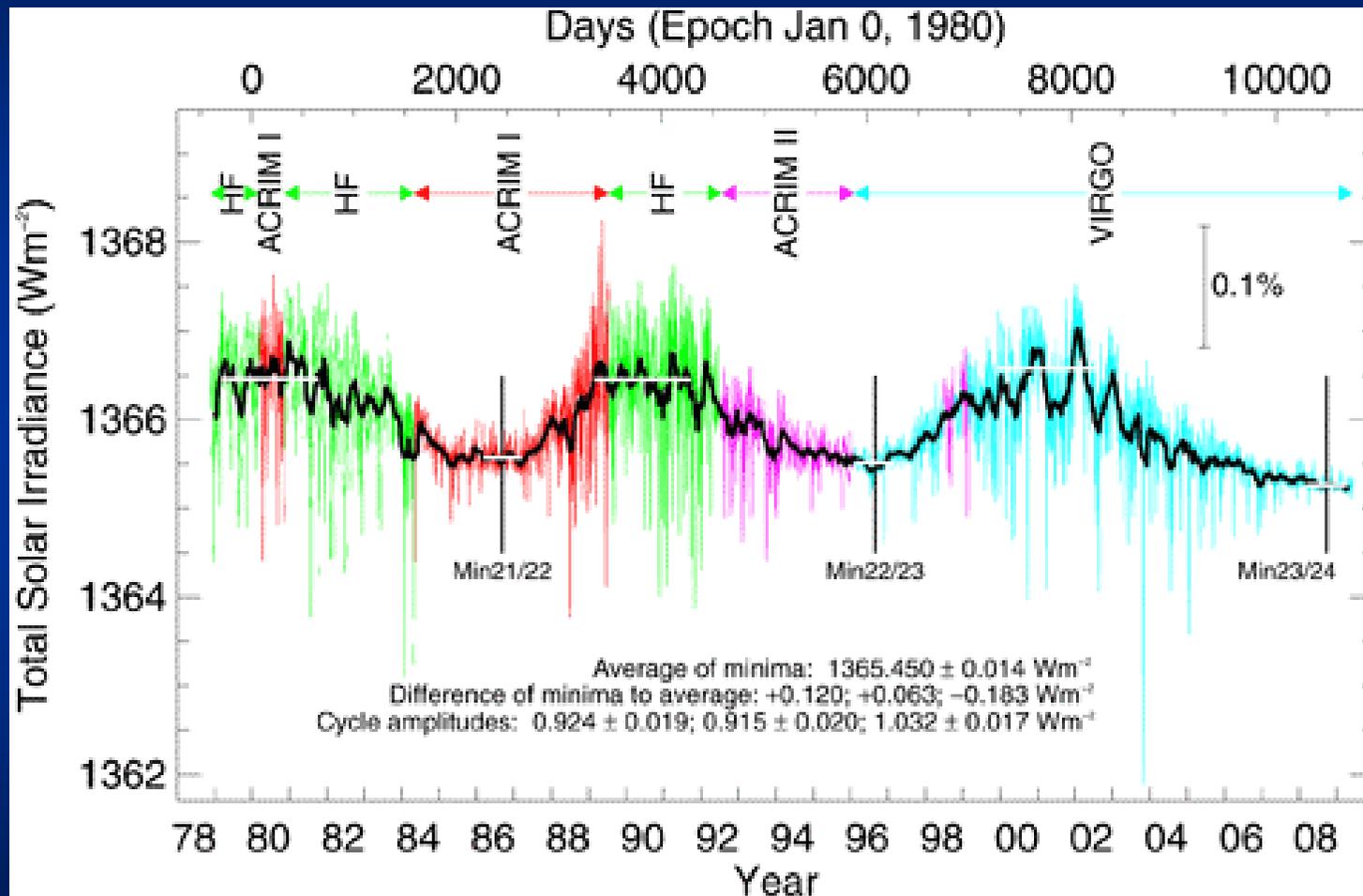
1.4 Die Sonne

1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



1.4 Die Sonne

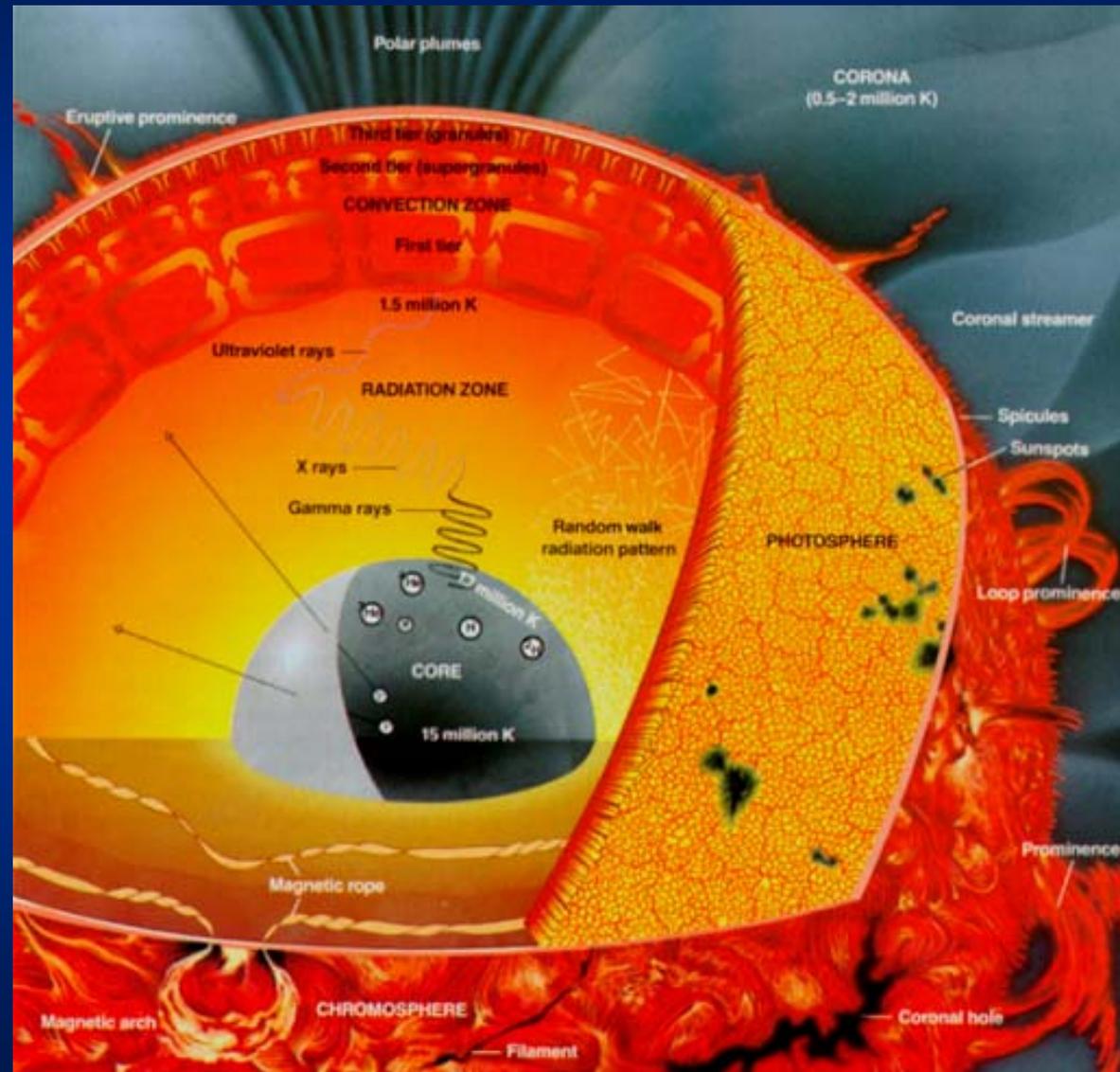
1.4.3.4 Strahlung und Spektrum



Schwankungen der solare Einstrahlung in den letzten Jahrzehnten, bestimmt aus Satellitenmessungen.

1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne



1.4 Die Sonne

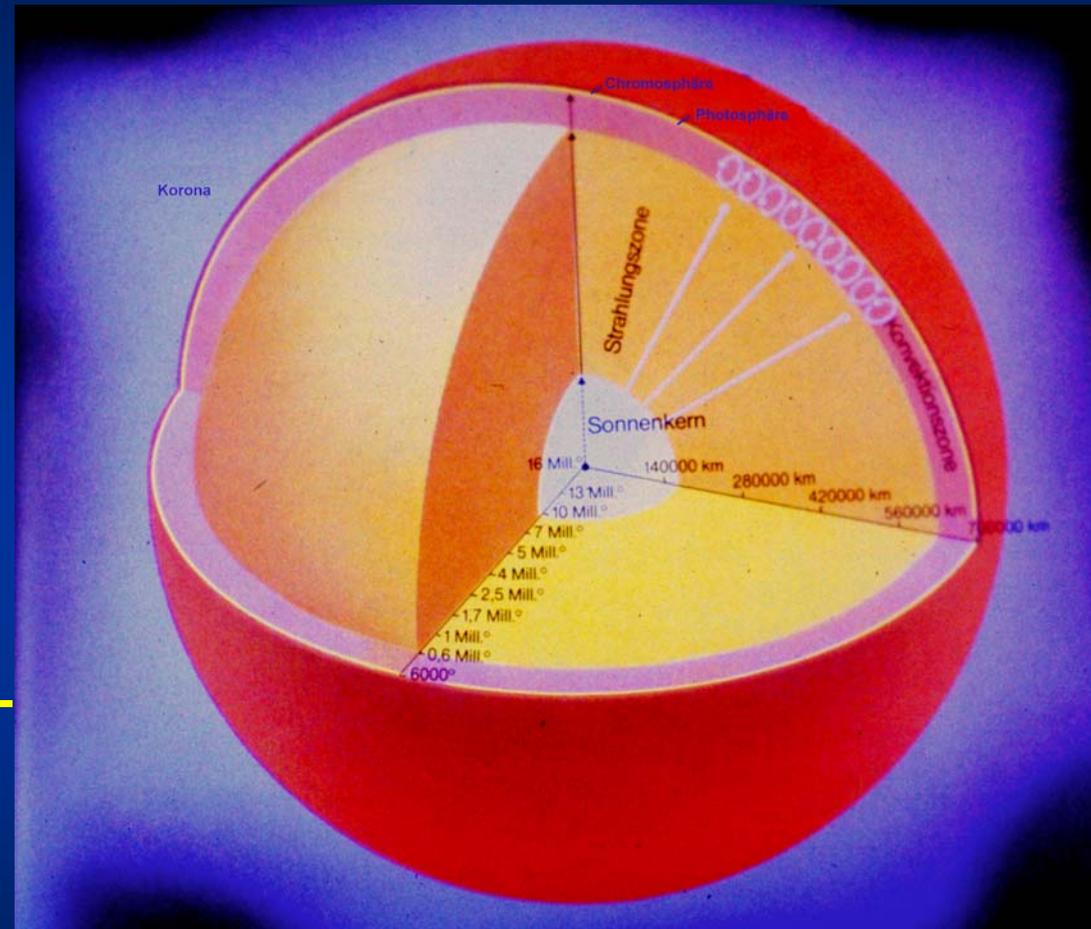
1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

Kern: Energieerzeugung, turbulent, optisch dick, umfaßt etwa 25% des Radius und etwa 64% des Volumens

Strahlungszone: stabile Schichtung, Energietransport durch Strahlung im γ - und Röntgenbereich, Photonenweglänge nur wenige Kernabstände. Bis hier ist das Plasma vollständig ionisiert.

Theoretischer Photonenweg bis zur Photosphäre („random walk“): >10'000 Lichtjahre



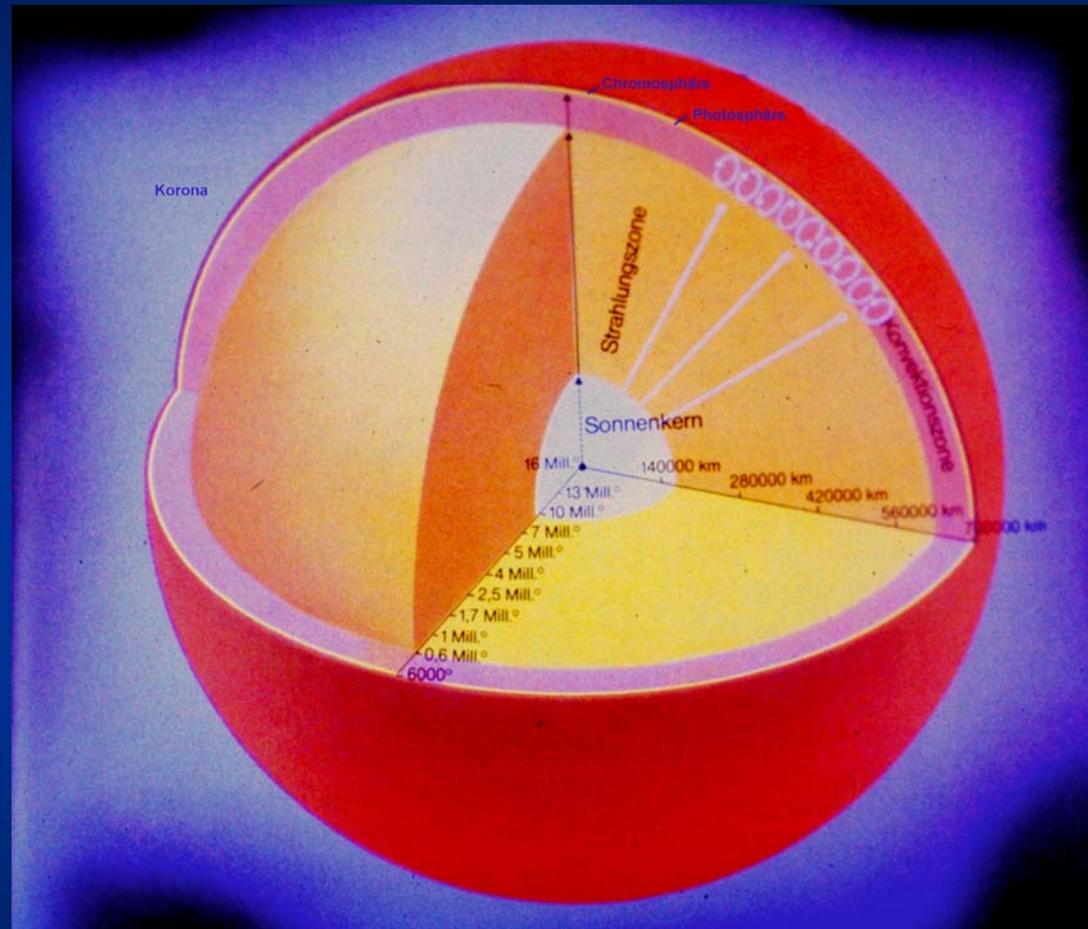
1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

Konvektionszone:

Bei ca. 71% Radius fällt die Temperatur unter 2 Mio. K – schwere Elemente können teilweise rekombinieren und Strahlung absorbieren: Das Plasma wird optisch dicker, instabil - über-adiabatisch, d.h. heiße Gasblasen erhalten Auftrieb. Ab etwa 80% Radius ist es optisch dick. Energietransport durch Konvektion.

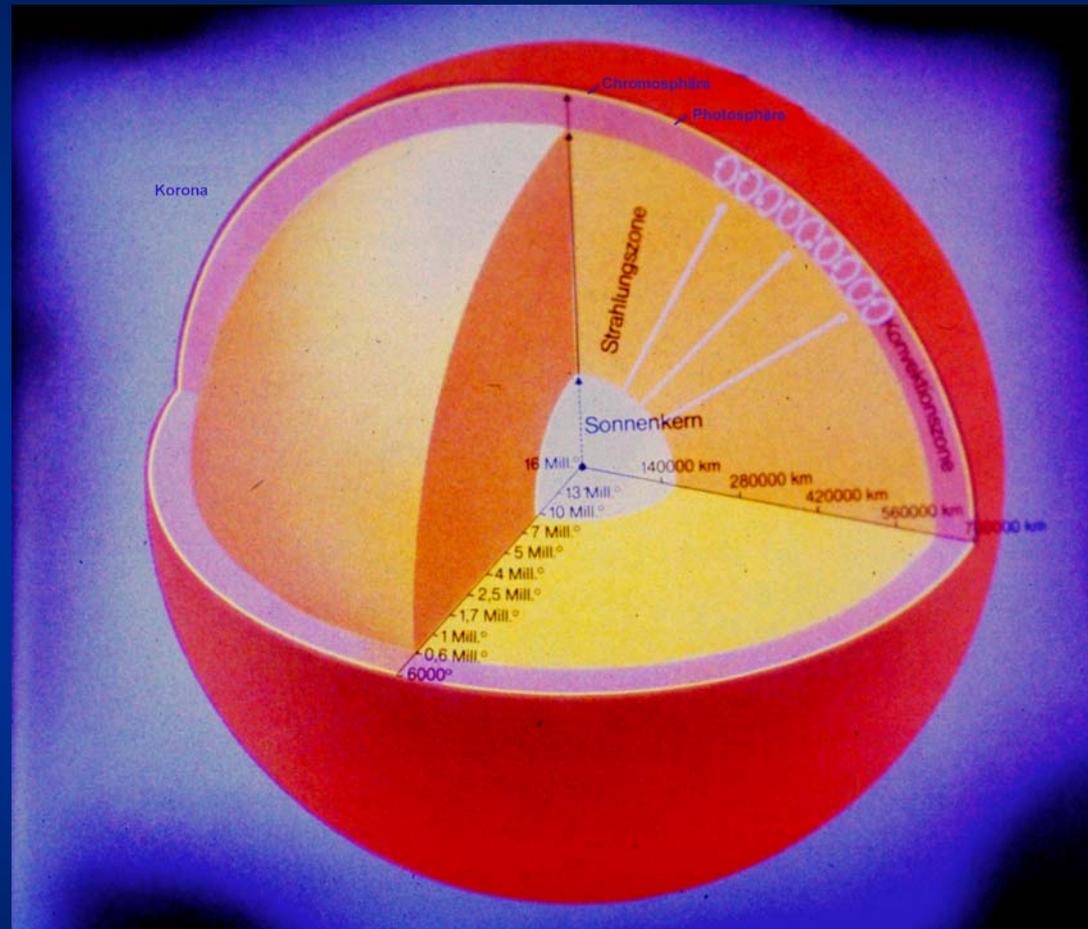


1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

Die Konvektionszone endet am Unterrand der Photosphäre, wo die Dichte so weit abgefallen ist, dass der Auftrieb der Gasblasen verschwindet und sie „hängen bleiben“ und ihre Energie abstrahlen. Dabei zerfallen sie, und das um etwa 500 K abgekühlte Gas strömt wieder nach unten.



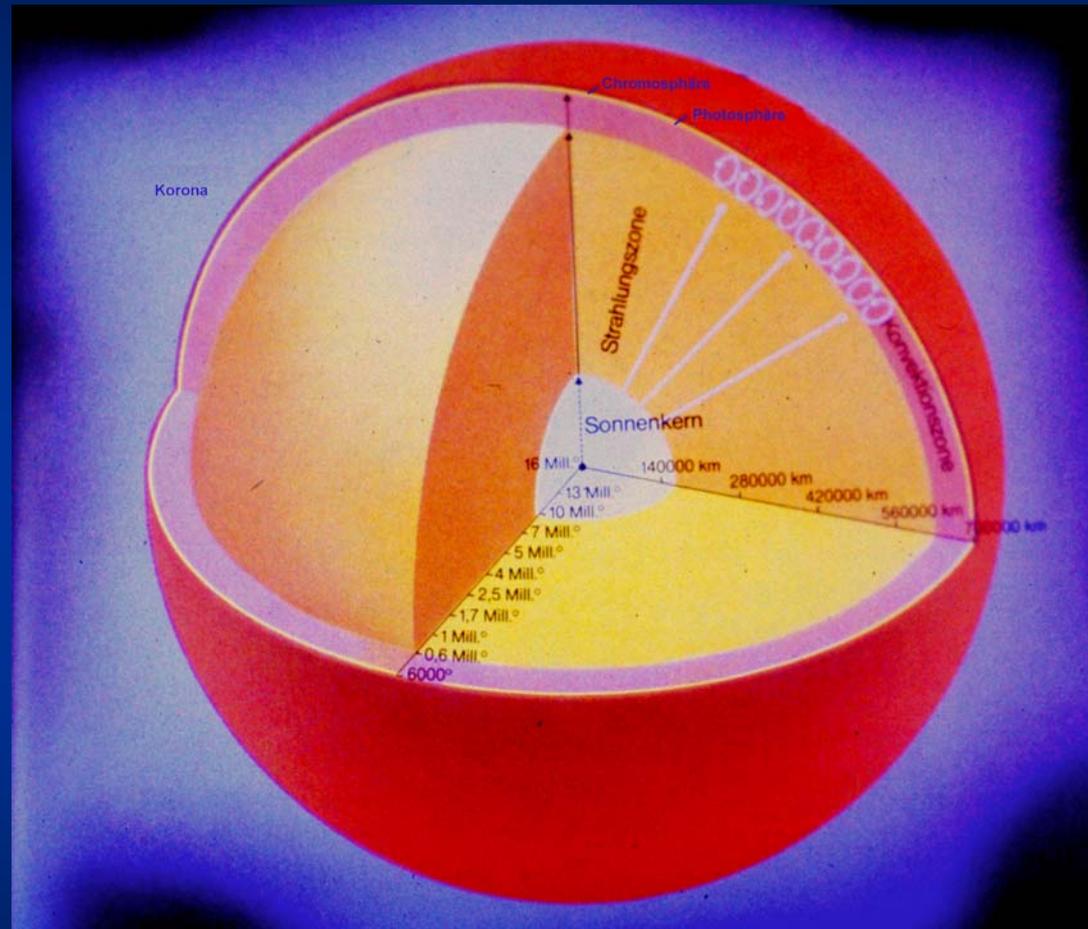
1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

Photosphäre: etwa 500 km dick, Temperaturminimum mit 4'300 K. Hier werden 99.99% der im Kern erzeugten Energie in Form von Strahlung abgegeben, die bis auf die Absorptionslinien (Fraunhofer-Linien) gut dem Spektrum eines Schwarzen Strahlers entspricht. Die Linien (ca. 50'000*) entstehen größtenteils durch Absorption in der Schicht selbst und geben damit deren Zusammensetzung wieder. Die beste Näherung für eine „Schwarzkörper-Temperatur“ der Sonne liegt bei 5'785 K.

** die längst noch nicht alle identifiziert sind*



1.4 Die Sonne

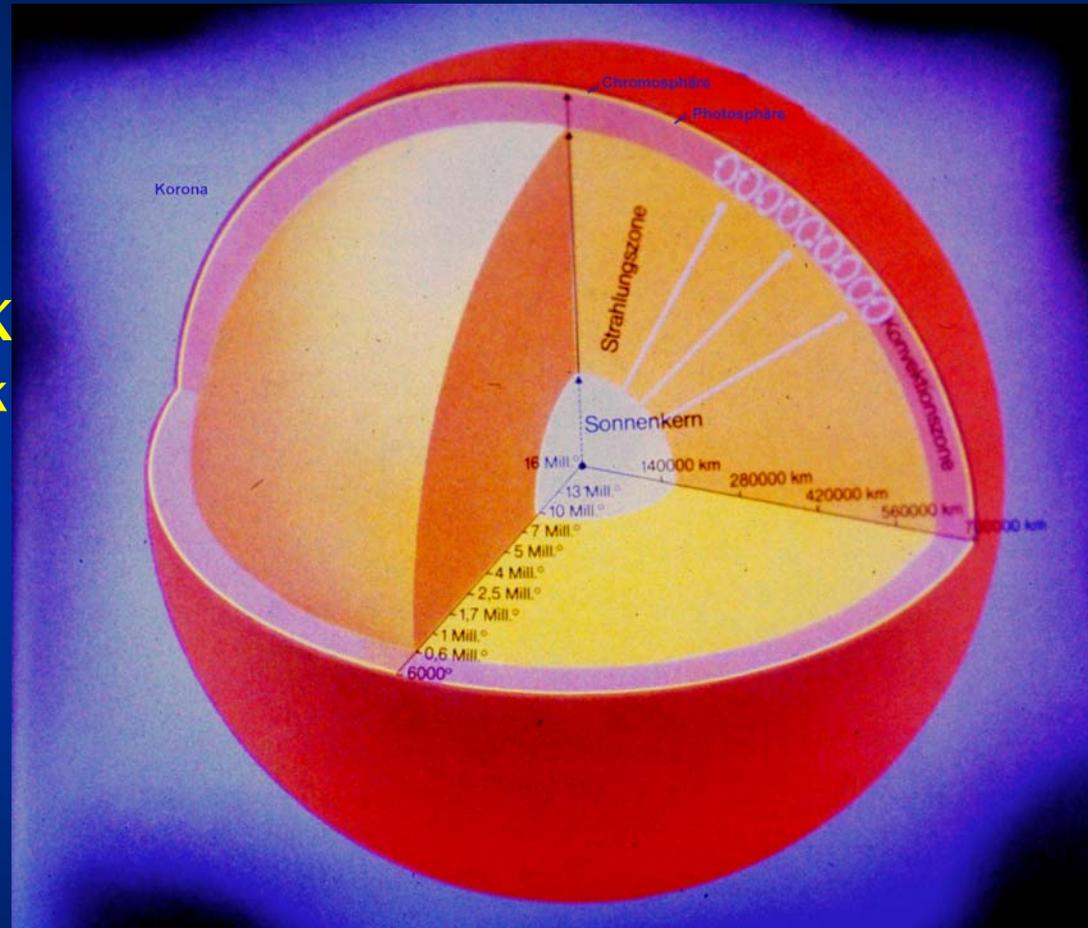
1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

Chromosphäre:

etwa 2'500 km dick

Hier steigt die Temperatur wieder bis auf etwa 50'000 K an, während die Dichte stark abfällt. Sie ist als farbiger Rand bei totalen Sonnenfinsternissen zu sehen – daher auch ihr Name.



1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne

Schichtenaufbau:

[Temperatur

Dichte]

Kern

15.6 Mio. K

$158 \text{ g cm}^{-3} *$

Konvektionszone

2 Mio. K**

Photosphäre

8'500...4'300 K

$10^{-9} \text{ g cm}^{-3} ***$

Chromosphäre

4'300...50'000 K

$10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$

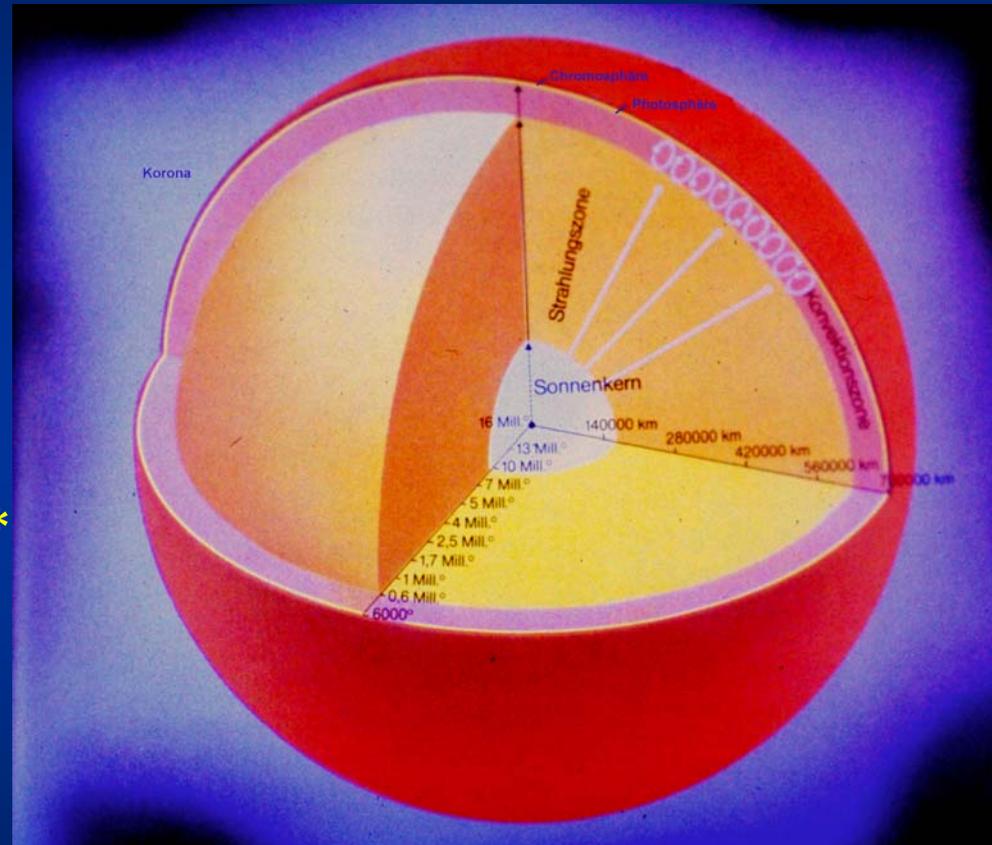
Korona

50'000...30 Mio. K

* 8-fache Dichte von Gold

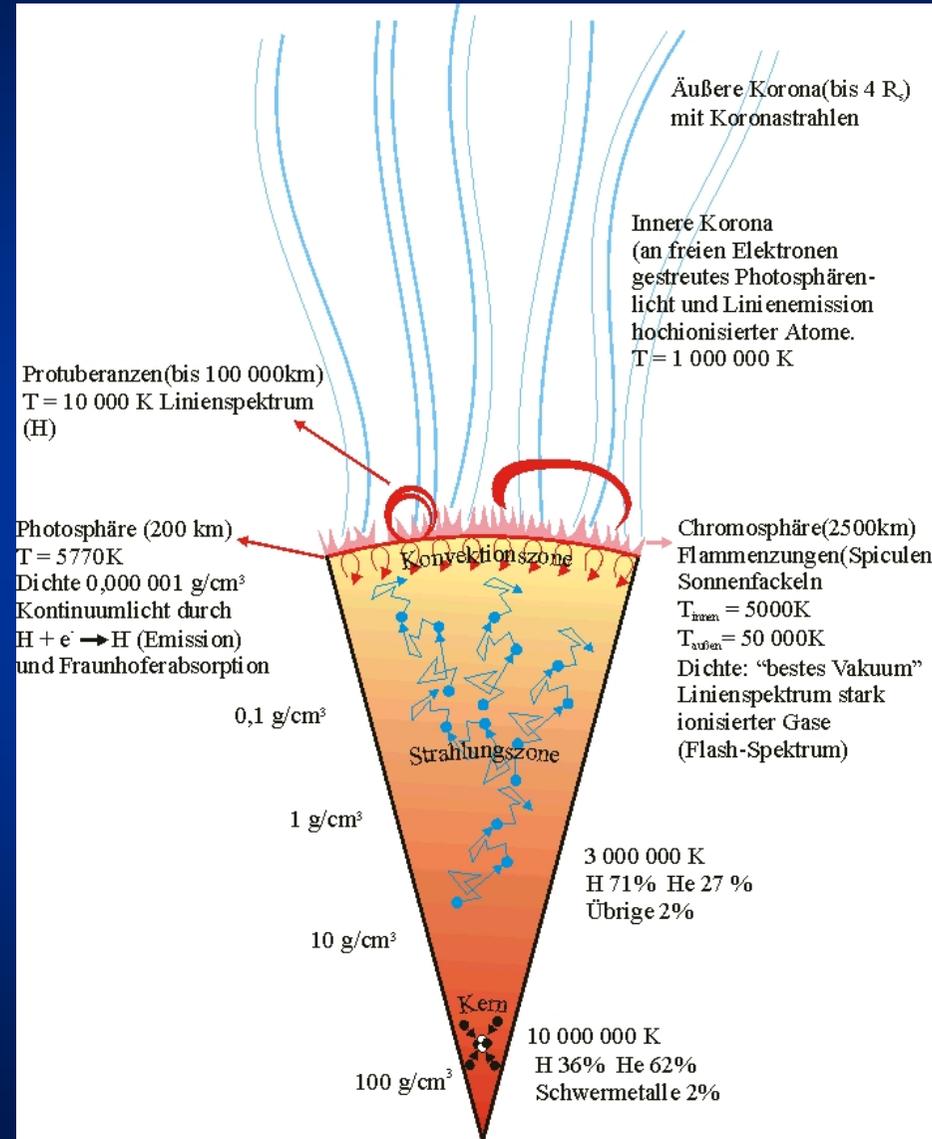
** Rekombination schwerer Elemente

*** 1/10'000 der Erdatmosphäre (NN)



1.4 Die Sonne

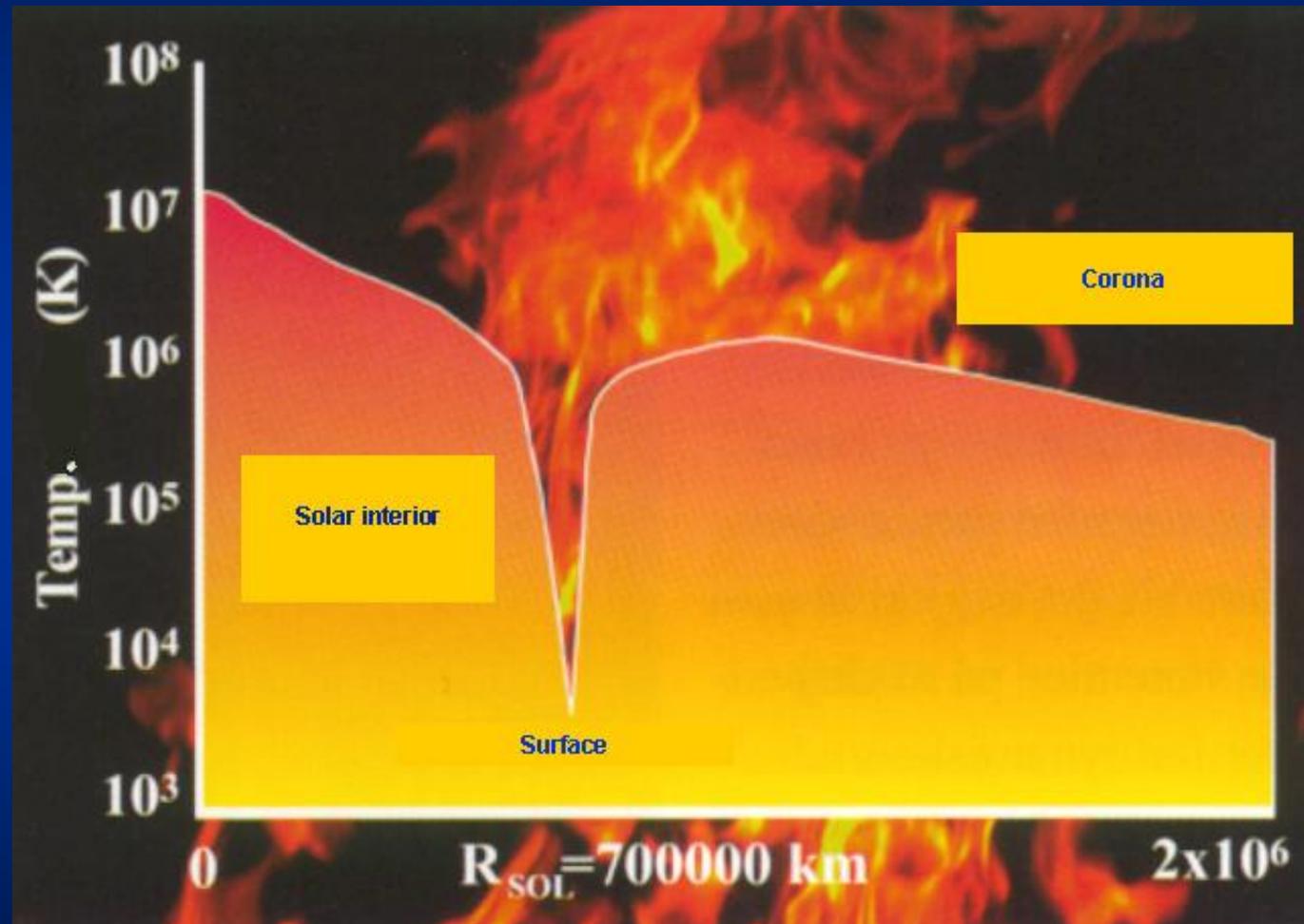
1.4.4.1 Aufbau der Sonne



(Prinzipiskizze - Zahlenwerte teilweise nicht ganz aktuell!)

1.4 Die Sonne

1.4.4.1 Aufbau der Sonne



Temperaturverlauf in der Sonne

1.4 Die Sonne

1.4.4.2 Chemische Zusammensetzung

Photosphäre:

[Element	Gewichts%	Atome%]
H	73.46	92
He	24.85	8
O	0.77	Summe Rest 0.1
C	0.29	
Fe	0.16	
Ne	0.12	
Si	0.07	
Mg	0.05	
S	0.04	

Kern:

X (H)	35	
Y (He)	63	
Z	2	(Elemente schwerer als He)

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Das thermische Energie-Reservoir der Sonne:

$$E_t = \int_0^R \frac{3}{2} \frac{k T}{\mu} \rho 4\pi r^2 dr = -\frac{3}{2} \frac{\overline{k T}}{\mu} M = 2.5 \cdot 10^{41} J$$

$$\int_0^R x \rho 4\pi r^2 dr$$

stellt im Ergebnis das Integral, d.h. die Aufsummierung der Größe x über das ganze Volumen und die Gesamtmasse dar.

k: Boltzmann-Konstante
μ: mittleres Molekulargewicht
r: Radius

T: Temperatur
ρ: Dichte
M: Gesamtmasse

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Das thermische Energie-Reservoir der Sonne:

$$E_t = \int_0^R \frac{3}{2} \frac{kT}{\mu} \rho 4\pi r^2 dr = -\frac{3}{2} \frac{\overline{kT}}{\mu} M = 2.5 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

Das Reservoir an potentieller (Gravitations-) Energie:

$$E_G = \int_0^R -\frac{GM(r)}{r} \rho 4\pi r^2 dr = -\frac{\overline{GM(r)}}{r} M = 4 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

*G: Universelle Gravitationskonstante
r: Radius*

*ρ : Dichte
M: Gesamtmasse*

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Das thermische Energie-Reservoir der Sonne:

$$E_t = \int_0^R \frac{3}{2} \frac{kT}{\mu} \rho 4\pi r^2 dr = -\frac{3}{2} \frac{\overline{kT}}{\mu} M = 2.5 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

Das Reservoir an potentieller (Gravitations-) Energie:

$$E_G = \int_0^R -\frac{GM(r)}{r} \rho 4\pi r^2 dr = -\frac{\overline{GM(r)}}{r} M = 4 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

Hieraus ergibt sich die theoretische konventionelle Lebensdauer:

$$\tau = \frac{E_t + E_G}{L} = \frac{6.5 \cdot 10^{41}}{4 \cdot 10^{26}} = 1.6 \cdot 10^{15} \text{ s} = 5 \cdot 10^7 \text{ a}$$

L: Leuchtkraft der Sonne

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Das Reservoir an nuklearer Energie:

$$E_N = 0.007^* M c^2 = 1.4 \cdot 10^{45} \text{ J}$$

Die theoretische „nukleare“ Lebensdauer:

$$\tau = \frac{E_N}{L} = \frac{1.4 \cdot 10^{45}}{4 \cdot 10^{26}} = 3.5 \cdot 10^{18} \text{ s} = 1.1 \cdot 10^{11} \text{ a}$$

** der maximale Wirkungsgrad der Kernfusion im Proton-Proton-Zyklus*

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

In Sternen erfolgt die Energieerzeugung durch Kernfusion, in der Sonne hauptsächlich über den Proton-Proton-Zyklus durch Verschmelzung von im Endeffekt jeweils vier Protonen (= Wasserstoff-Kernen) zu einem $^4\text{Helium}$ -Kern.

Hierbei entsteht ein Massendefizit, denn die Masse des entstehenden Heliums (4.0026 amu^*) ist um den Faktor $\eta=0.007$ kleiner als die Summe der Massen der vier Protonen ($4 \cdot 1.0079 \text{ amu} = 4.0316$).

Dieses Massendefizit führt zu einer Energieerzeugung:

$$E_p = \eta mc^2 = 0.007 \cdot 1.0079 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ c}^2 = 1.05 \cdot 10^{-12} \text{ J /Proton}$$

und einer Energieerzeugungsrate:

$$\varepsilon = E_p \cdot N_H / M = 1.05 \cdot 10^{-12} \cdot 5.98 \cdot 10^{23} = 6.3 \cdot 10^{11} \text{ J/g}$$

(= Heizwert von 20'000 m³ Gas, 21 t Brikett oder 16 t Erdöl)

* amu: atomare Masseneinheit = $1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ - N_H : Zahl der Protonen pro Gramm

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

In Sternen erfolgt die Energieerzeugung durch Kernfusion, in der Sonne hauptsächlich über den Proton-Proton-Zyklus durch Verschmelzung von im Endeffekt jeweils vier Protonen (= Wasserstoff-Kernen) zu einem $^4\text{Helium}$ -Kern.

Hierbei entsteht ein Massendefizit, denn die Masse des entstehenden Heliums (4.0026 amu^*) ist um den Faktor $\eta=0.007$ kleiner als die Summe der Massen der vier Protonen ($4 \cdot 1.0079 \text{ amu} = 4.0316$).

Dieses Massendefizit führt zu einer Energieerzeugung:

$$E_p = \eta mc^2 = 0.007 \cdot 1.0079 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ c}^2 = 1.05 \cdot 10^{-12} \text{ J /Proton}$$

und einer Energieerzeugungsrate:

$$\varepsilon = E_p \cdot N_H / M = 1.05 \cdot 10^{-12} \cdot 5.98 \cdot 10^{23} = 6.3 \cdot 10^{11} \text{ J/g}$$

(= Heizwert von $20'000 \text{ m}^3$ Gas, 21 t Brikett oder 16 t Erdöl)

2% gehen durch Neutrinos verloren.

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Nebenprodukte sind die Kerne von Deuterium (^2D oder ^2H) und ^3He sowie die seltenen Elemente Lithium, Beryllium und Bor.

Außerdem läuft in der Sonne in kleinem Umfang (1.6 %) auch der Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus) ab, bei dem aus Helium die Isotope der schwereren Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff entstehen.

Um die Leuchtkraft der Sonne:

$$L = 4 \cdot 10^{26} \text{ J/s}$$

zu erzeugen, muss folgender Massenumsatz stattfinden:

$$M/t = L/\varepsilon = (4 \cdot 10^{26} \text{ J/s}) / (6.3 \cdot 10^{11} \text{ J/g}) = 6.35 \cdot 10^{14} \text{ g/s}$$

d.h. in der Sonne werden in jeder Sekunde 635 Mio. t Wasserstoff in 631 Mio. t Helium umgewandelt.

Es werden also 4.445 Mio. t Masse in Energie umgewandelt.

1.4 Die Sonne

1.4.4.3 Energieerzeugung

Es werden also 4.445 Mio. t Masse pro Sekunde in Energie umgewandelt.

Diese Masse geht der Sonne verloren. Hinzu kommen noch einmal 1 Mio. t/s an Massenverlust durch den Sonnenwind.

Summiert über die Lebensdauer der Sonne ergibt dies einen Wert von $1.6 \cdot 10^{27}$ kg. Das sind jedoch nur <0.001 der Gesamtmasse!

1.4 Die Sonne

1.4.4.4 Energietransport

Innerhalb des Kerns erfolgt der Energietransport wegen seiner hohen Dichte durch turbulenten Austausch, der Kern ist optisch dick.

Die optische Dicke (oder Dichte) τ ist für eine Strahlungsfrequenz definiert:

$$\tau(\nu) = \int_0^d \alpha(s, \nu) ds$$

wobei α der Absorptionskoeffizient, ν die Frequenz und d der Lichtweg sind. Die gesamte optische Dicke ist dann die Summe über alle Frequenzen.

1.4 Die Sonne

1.4.4.4 Energietransport

Innerhalb des Kerns erfolgt der Energietransport wegen seiner hohen Dichte durch turbulenten Austausch, der Kern ist optisch dick.

Es folgt die Strahlungszone, in der der Energietransport durch Strahlung, wegen der hohen Temperaturen γ - und Röntgen-Strahlung (XR), erfolgt. (Strahlungstransport)

Dabei wird Strahlung absorbiert, gestreut und wieder re-emittiert.

In der darüber liegenden Konvektionszone erfolgt der Energietransport durch das Aufsteigen heißer Konvektionszellen mit Geschwindigkeiten von 1-2 km/s bis zum Unterrand der Photosphäre, wo diese Zellen innerhalb weniger Minuten zerfallen.

Darüber erfolgt der Energietransport

- überwiegend durch Strahlung**
- durch Wellen (Schall- und Schwerewellen)**
- durch magnetohydrodynamische Prozesse / Alfvén-(Plasma-)Wellen**
- durch Teilchenströme (Sonnenwind)**

1.4 Die Sonne

1.4.5.1 Granulation

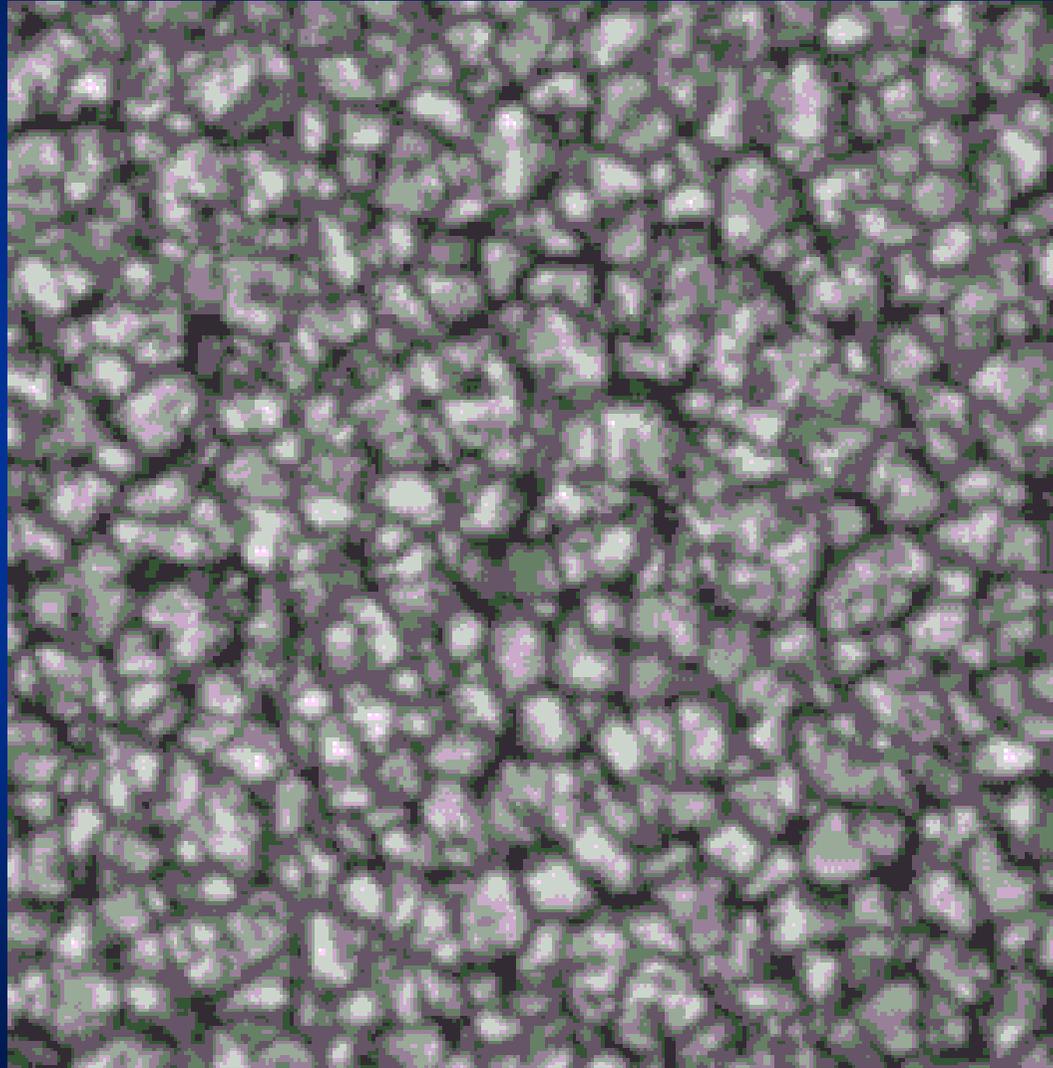
Die Granulation ist das Abbild der Oberseite der Konvektionszone und zeigt die hellen (heißen) Gasblasen und ihren Zerfall innerhalb weniger Minuten mit dem Abströmen des kühleren und dunkleren Gases an ihren Rändern.

Die Granulationszellen messen 1...2'000 km (2").

Die Granulation ist, außer in Sonnenflecken, auf der gesamten Oberfläche der Sonne vorhanden.

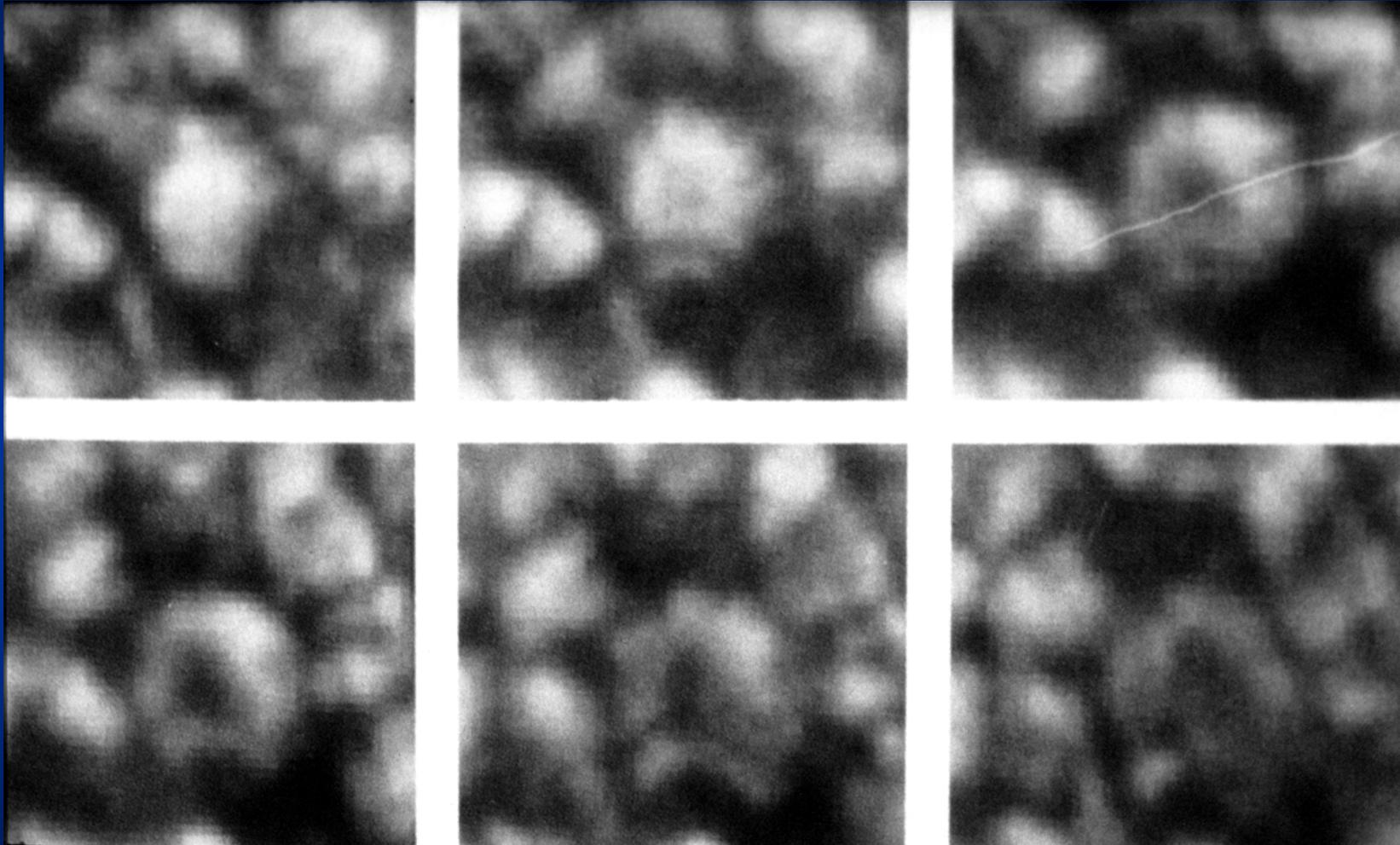
1.4 Die Sonne

1.4.5.1 Granulation



1.4 Die Sonne

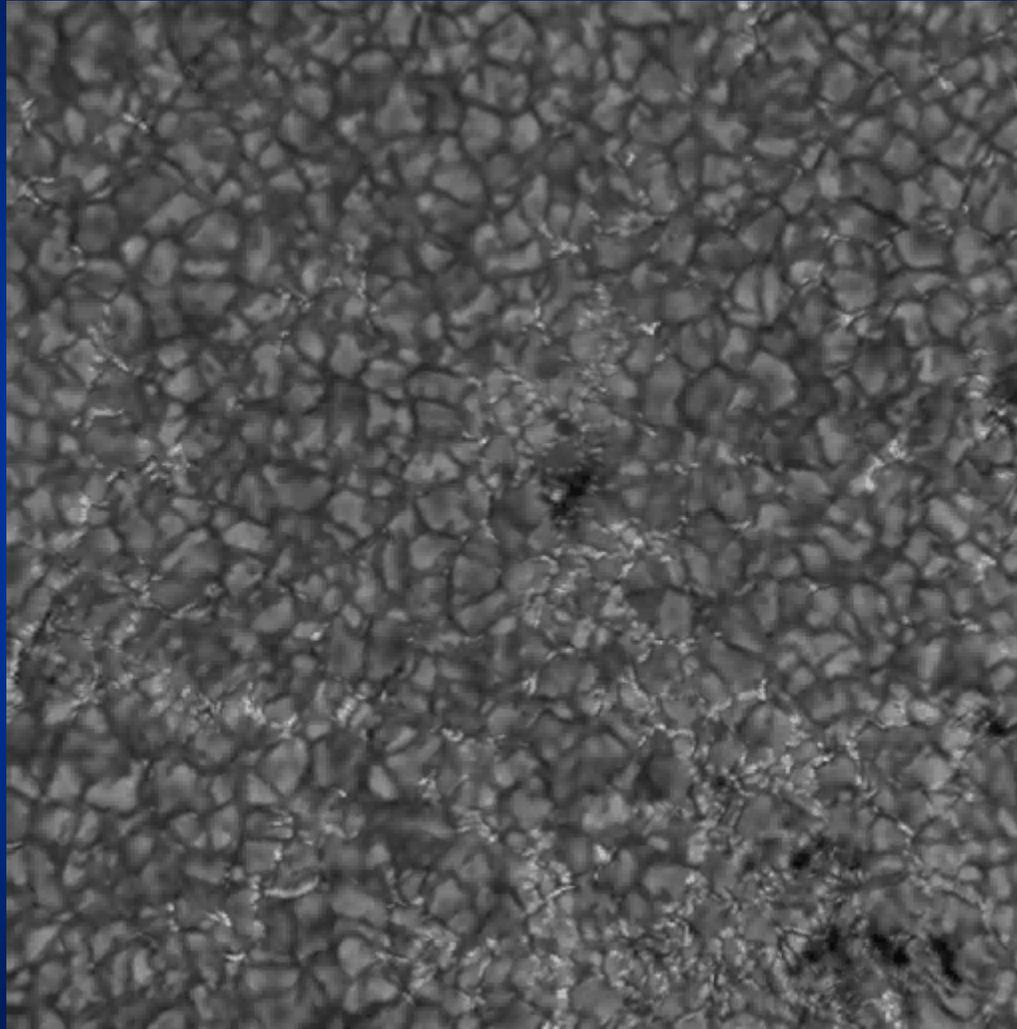
1.4.5.1 Granulation



Detailbilder einer zerfallenden Granule

1.4 Die Sonne

1.4.5.1 Granulation



VTT 2003-05-27 mit adaptiver Optik
(Kiepenheuer-Institut, Freiburg)

1.4 Die Sonne

1.4.5.1 Granulation

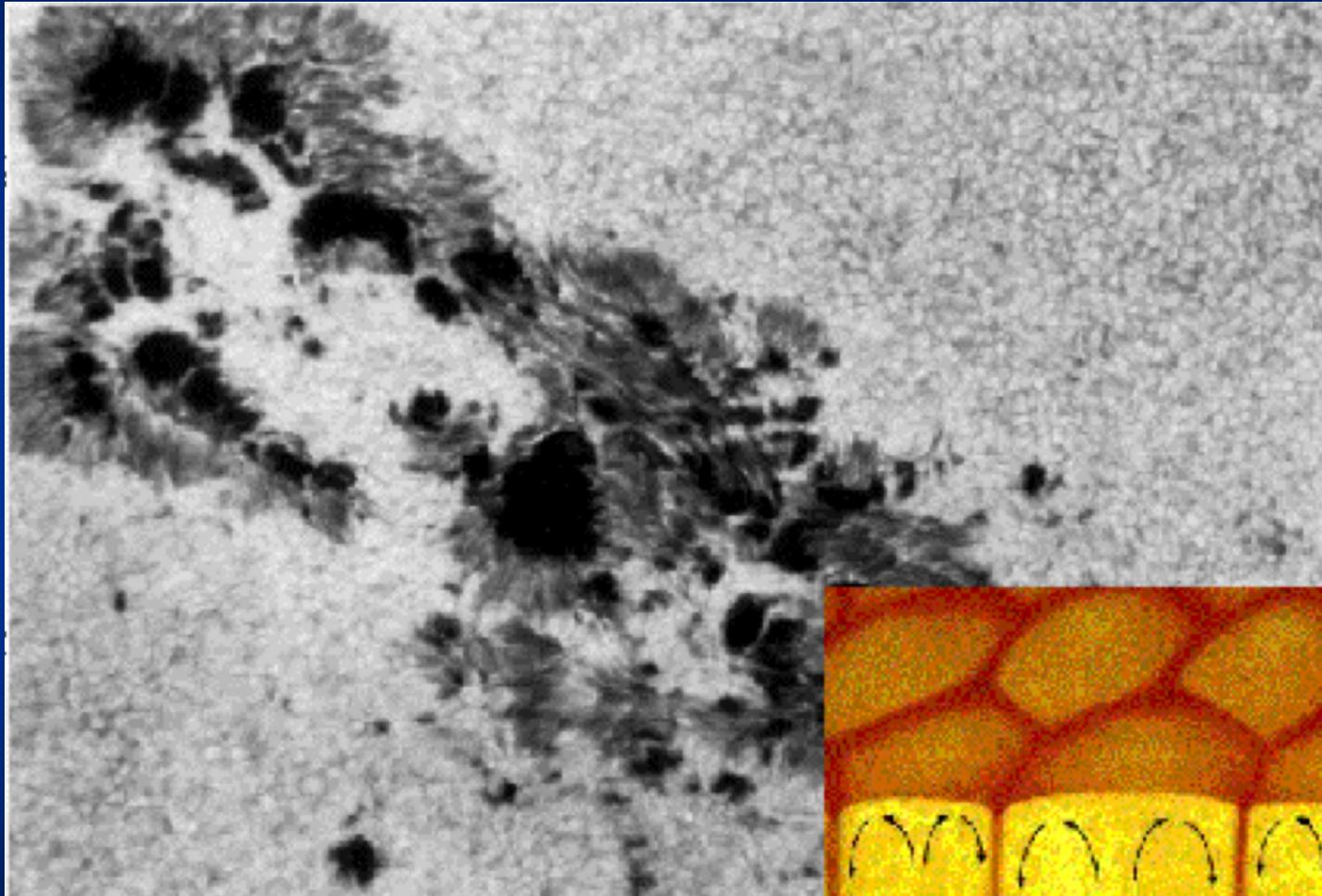
Ein ähnlicher Prozess kann in einer Tasse mit heißem Kaffee beobachtet werden:



Genau genommen sieht man allerdings den Dampf/Nebel, der sich über den verschieden heißen Flüssigkeitsbereichen bildet.

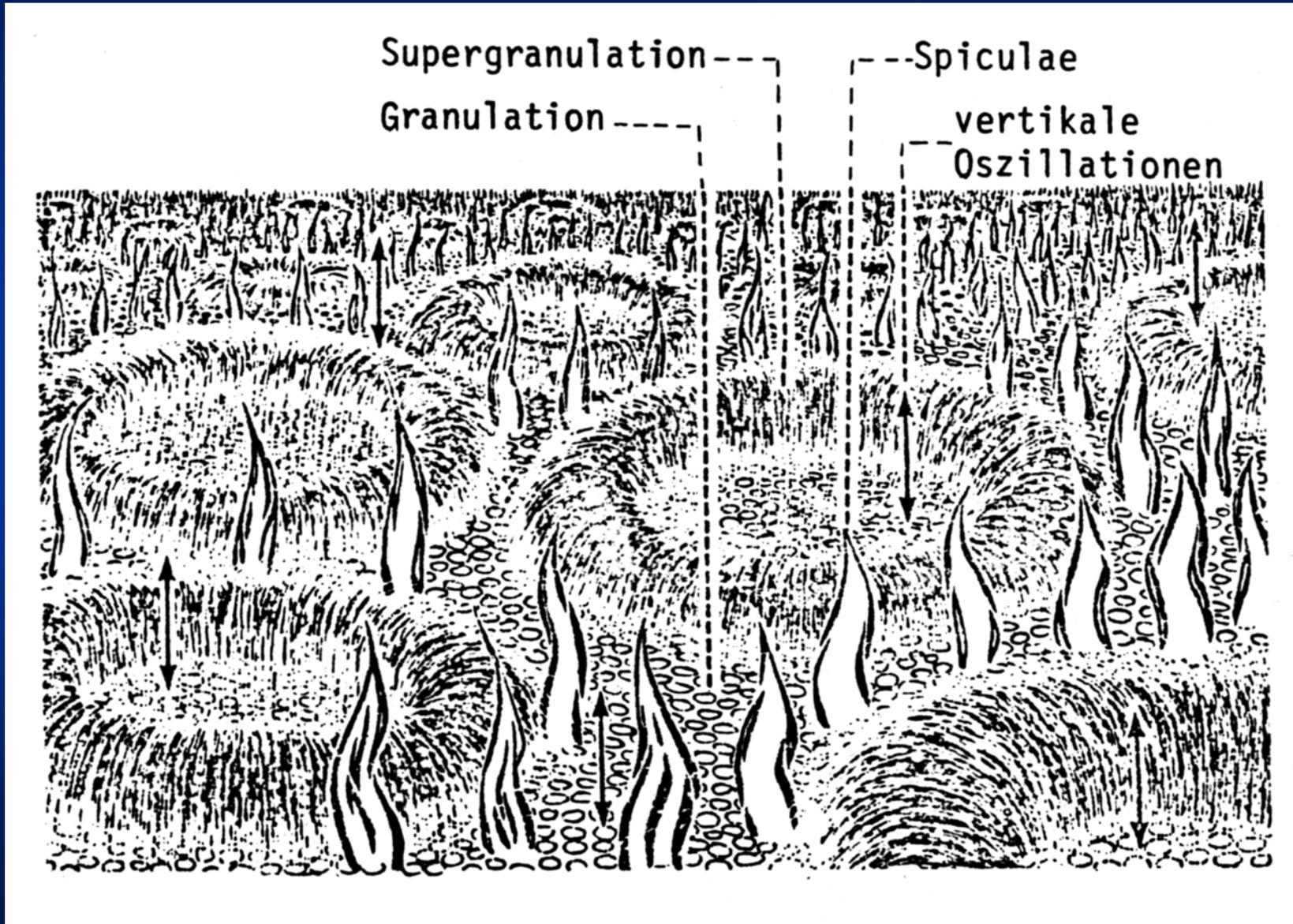
1.4 Die Sonne

1.4.5.1 Granulation



1.4 Die Sonne

1.4.5.2 Supergranulation



1.4 Die Sonne

1.4.5.3 Chromosphärisches Netzwerk

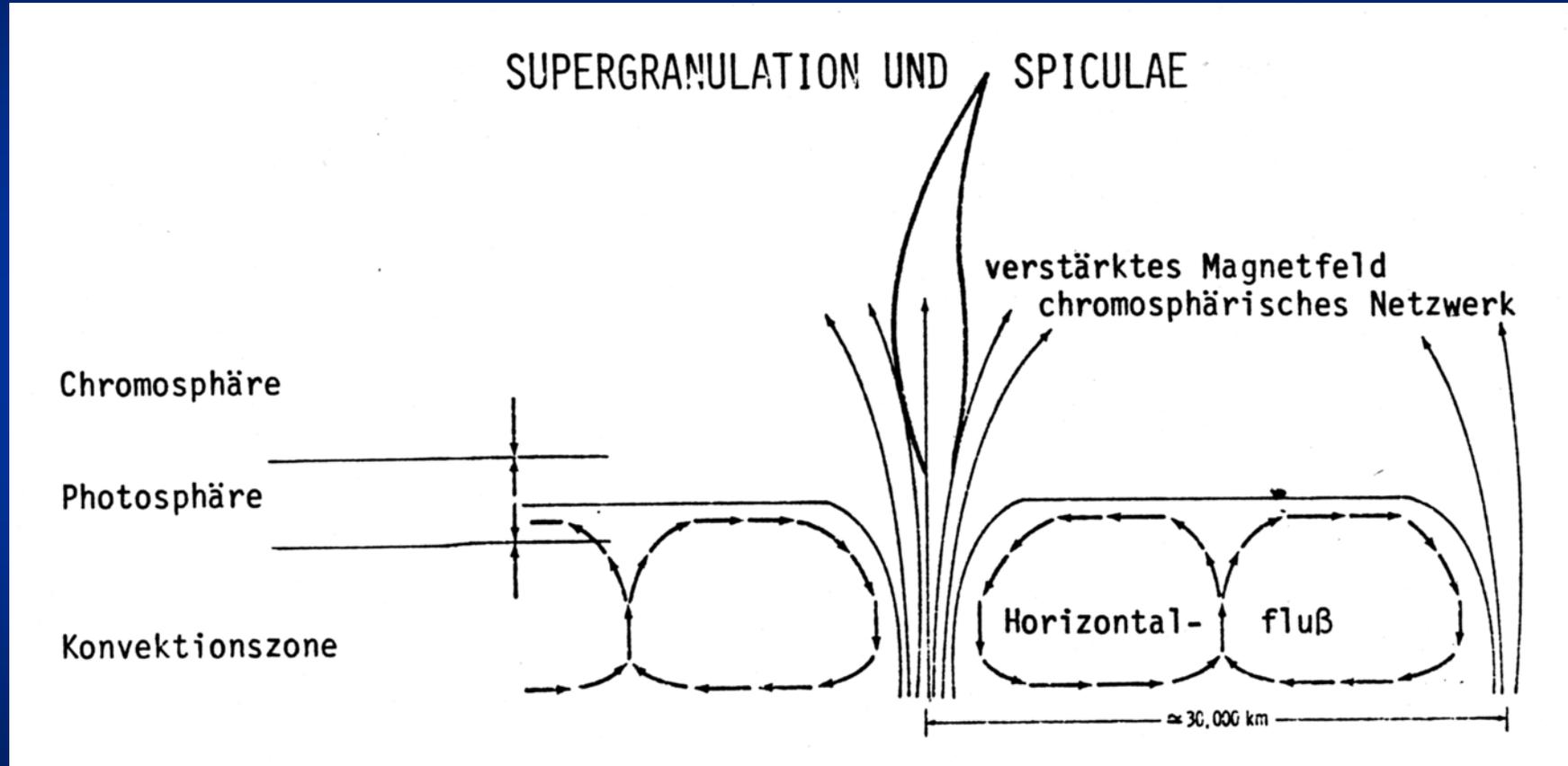
Supergranulen sind an Helium gebunden, haben eine Größe von ca. 30...35'000 km und eine Lebensdauer von etwa 1^d.

An ihren Grenzen bilden sich Magnetfasern aus mit Durchmessern von 100...300 km, die Verbindung mit höheren Sonnenschichten haben. Magnetfeldstärken: 0.1...0.2 T (1...2'000 Gs)

Möglicherweise leiten sie Energie nach außen durch magneto-akustische Wellen.

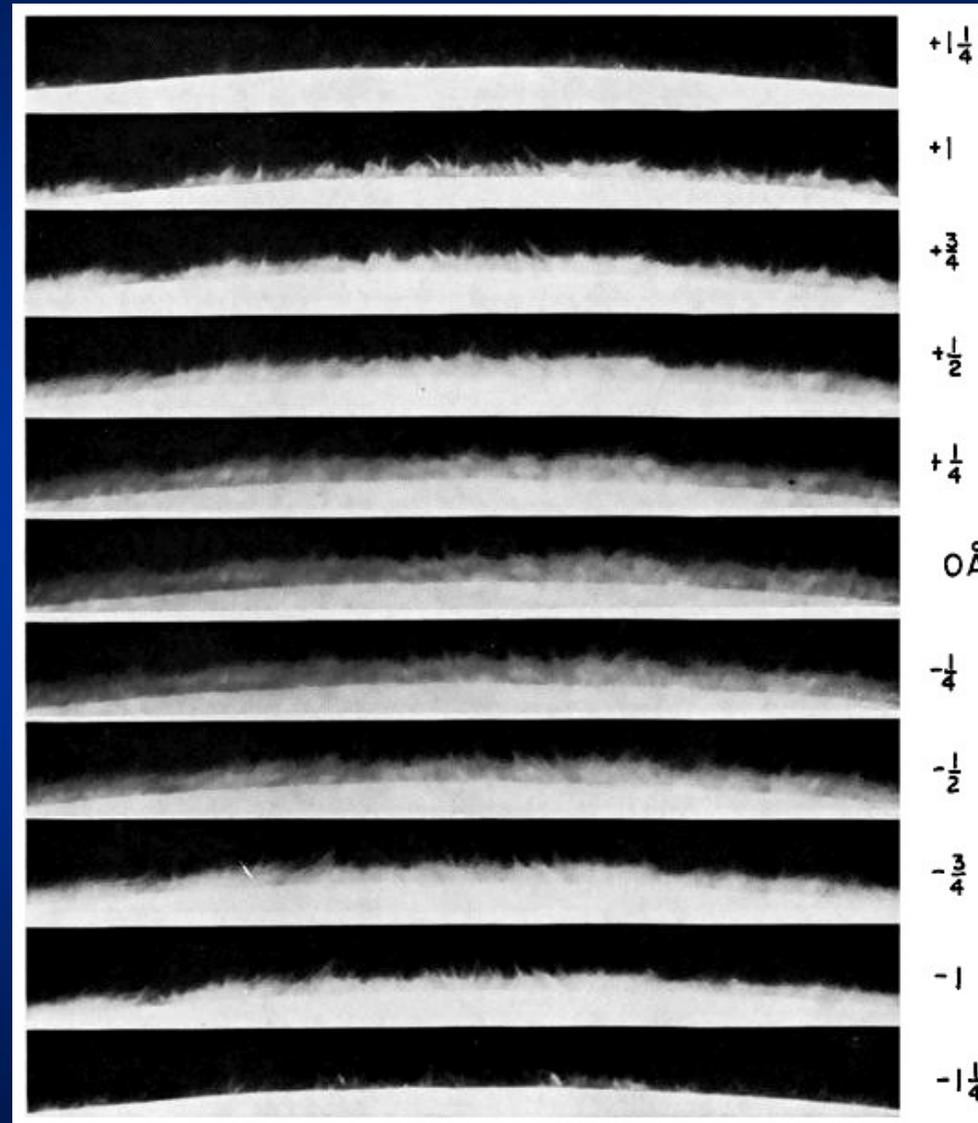
1.4 Die Sonne

1.4.5.4 Spikulen (Spiculae)



1.4 Die Sonne

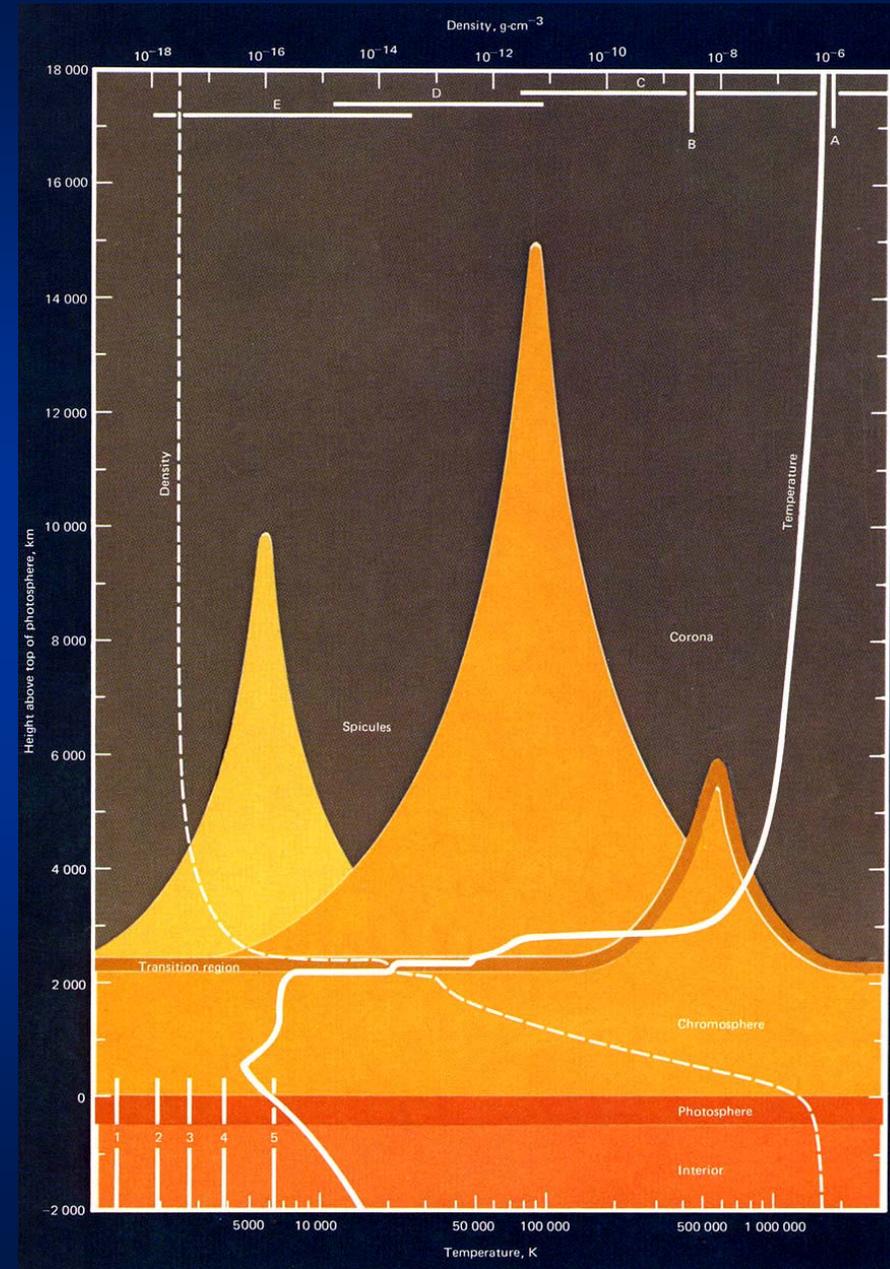
1.4.5.4 Spikulen (Spiculae)



(Lynch, Beckers, Dunn- A Morphological Study of Solar Spicules, 1973)

1.4 Die Sonne

1.4.5.4 Spikulen (Spiculae)



1.4 Die Sonne

1.4.5.4 Spikulen (Spiculae)



(Bart de Pontieu, Swedish Solar Telescope, 2004-07-28)