

Methoden zur Bestimmung der Zustandsgrößen von Sternen

Stephan Koopmans

Birgitta Müller

Ludwig-Maximilians-Universität München

21. Nov. 2012

Übersicht

1. Entfernung
2. Helligkeit
3. Leuchtkraft
4. Radius
5. Effektivtemperatur
6. Masse
7. Chemische Zusammensetzung/Metallizität
8. Masse-Leuchtkraft-Gesetz
9. Hertzsprung-Russell-Diagramm

Entfernung

- Keine Zustandsgröße im eigentlichen Sinn
- Zur Bestimmung anderer Zustandsgrößen notwendig

Methoden (Beispiele):

- Fixsternparallaxe
- Spektroskopische Parallaxe

Fixsternparallaxe

- Betrachtung der Position eines Sterns vor seinem Hintergrund
- Messung des Verschiebungswinkels

Trigonometrie liefert:

$$D = \frac{a}{\tan p} \approx \frac{a}{p}$$

Für die Erde:

$$D = \frac{1}{p \text{ ['']}} [pc]$$

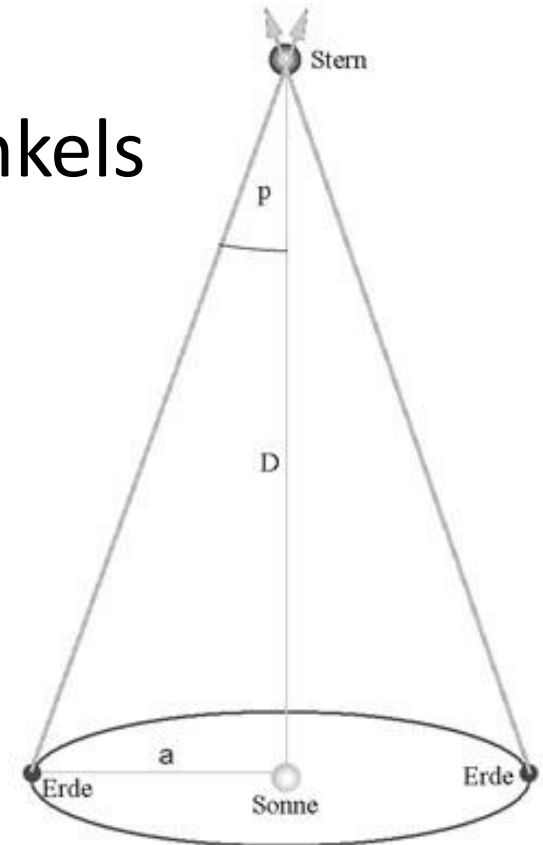


Abbildung 1: Trigonometrische Parallaxe

Fixsternparallaxe

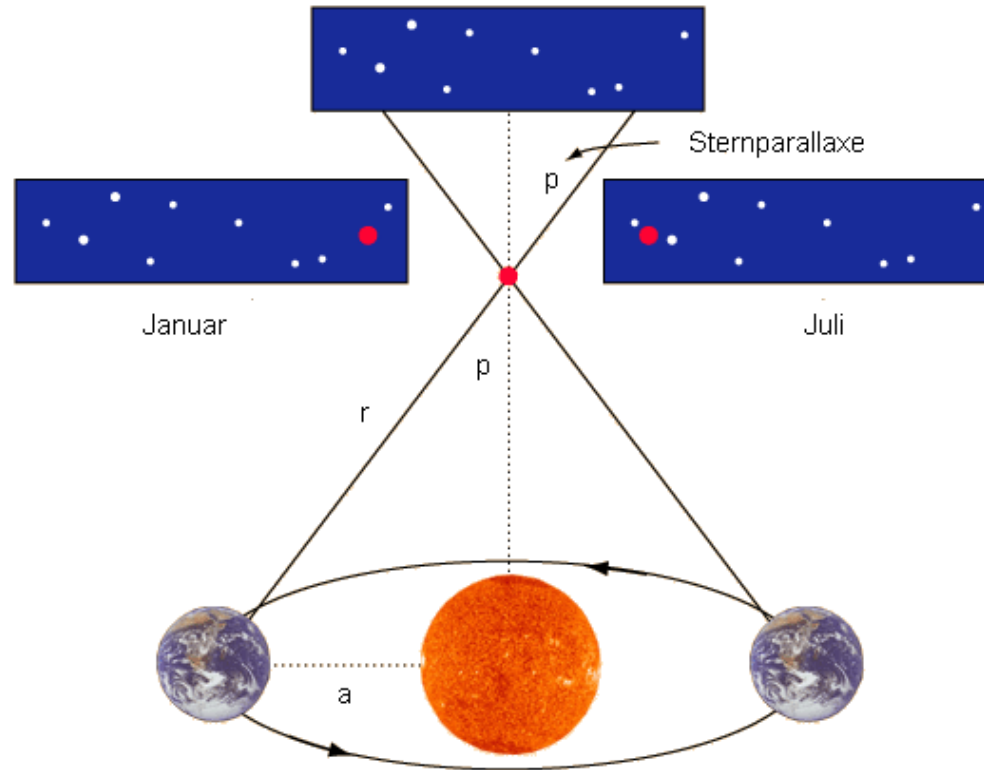


Abbildung 2: Scheinbare Positionsveränderung des Sterns

$$1pc = \frac{1 AE}{\frac{2\pi}{360 \cdot 60 \cdot 60}} = 3.09 \cdot 10^{16} m$$

Helligkeit

- Scheinbare Helligkeit
- Absolute Helligkeit

Scheinbare Helligkeit

- Helligkeit des Sterns von der Erde aus gesehen
- Vergleich mit Vega ($m_{\text{Vega}} = 0$)

$$m = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_{\text{Vega}}}$$

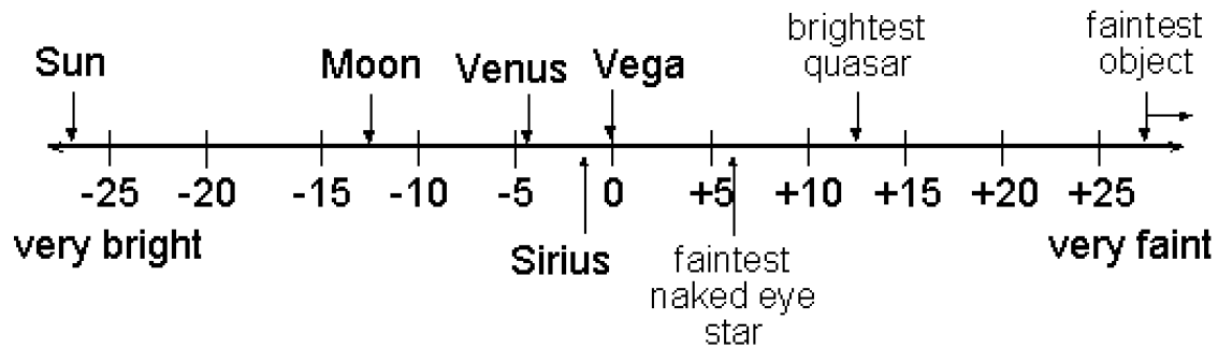
Absolute Helligkeit

- Scheinbare Helligkeit in $r_0 = 10kpc$ Entfernung
- Entfernungsunabhängig

$$M = m - 2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{r^2}{r_0^2} \right)$$

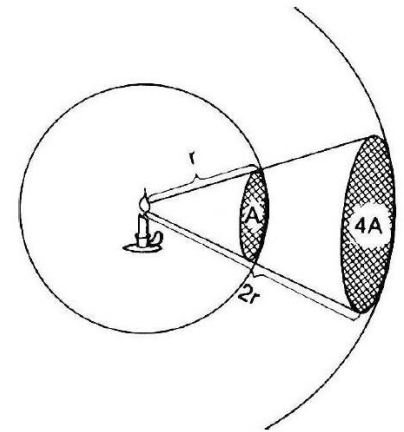
Sonne

$$M_{\odot} = -26,81$$



Leuchtkraft

- Photonen zählen über das gesamte Spektrum
- Aus Abstand und Energiefluss
 - Integral über den Energiefluss



$$L = 4\pi R^2 F = 4\pi R^2 \int_V F_\nu dV$$

- Sonne $L_\odot = 3,86 \cdot 10^{26} W$
- Typische Sterne $L = 10^{-4} \dots 10^6 L_\odot$

Radius

Methoden

- Trigonometrische Messung
- Interferometrische Winkelradienmessung
- Bedeckungsveränderliche

Trigonometrische Messung

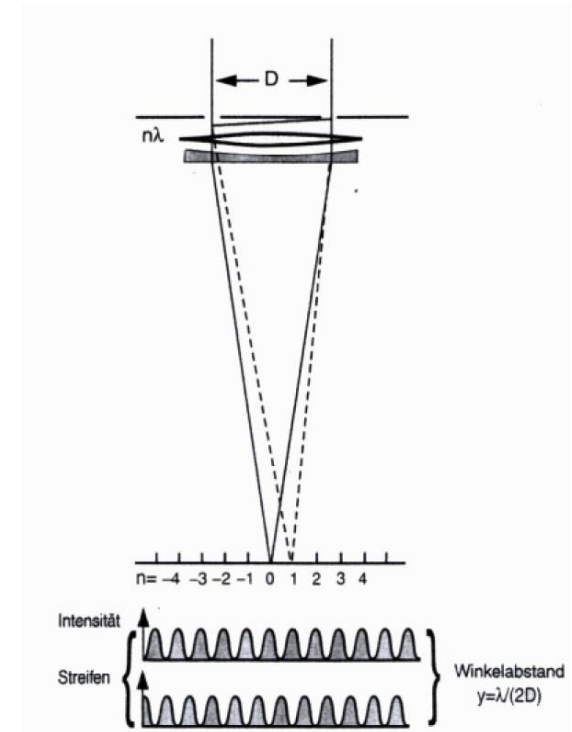
- bis $\alpha \geq 1''$
- Sonne $\alpha_{\odot} = 31'59''$
- Nur für sehr wenige Sterne anwendbar

Interferometrische Winkelradienmessung

- bis $\alpha \geq 10^{-4}''$ ($\approx 10\text{pc}$)
- Rechnerische Näherung
 - Stern als zwei Punktquellen
 - Einfall durch verschiedene Spalte
→ Interferenzmuster

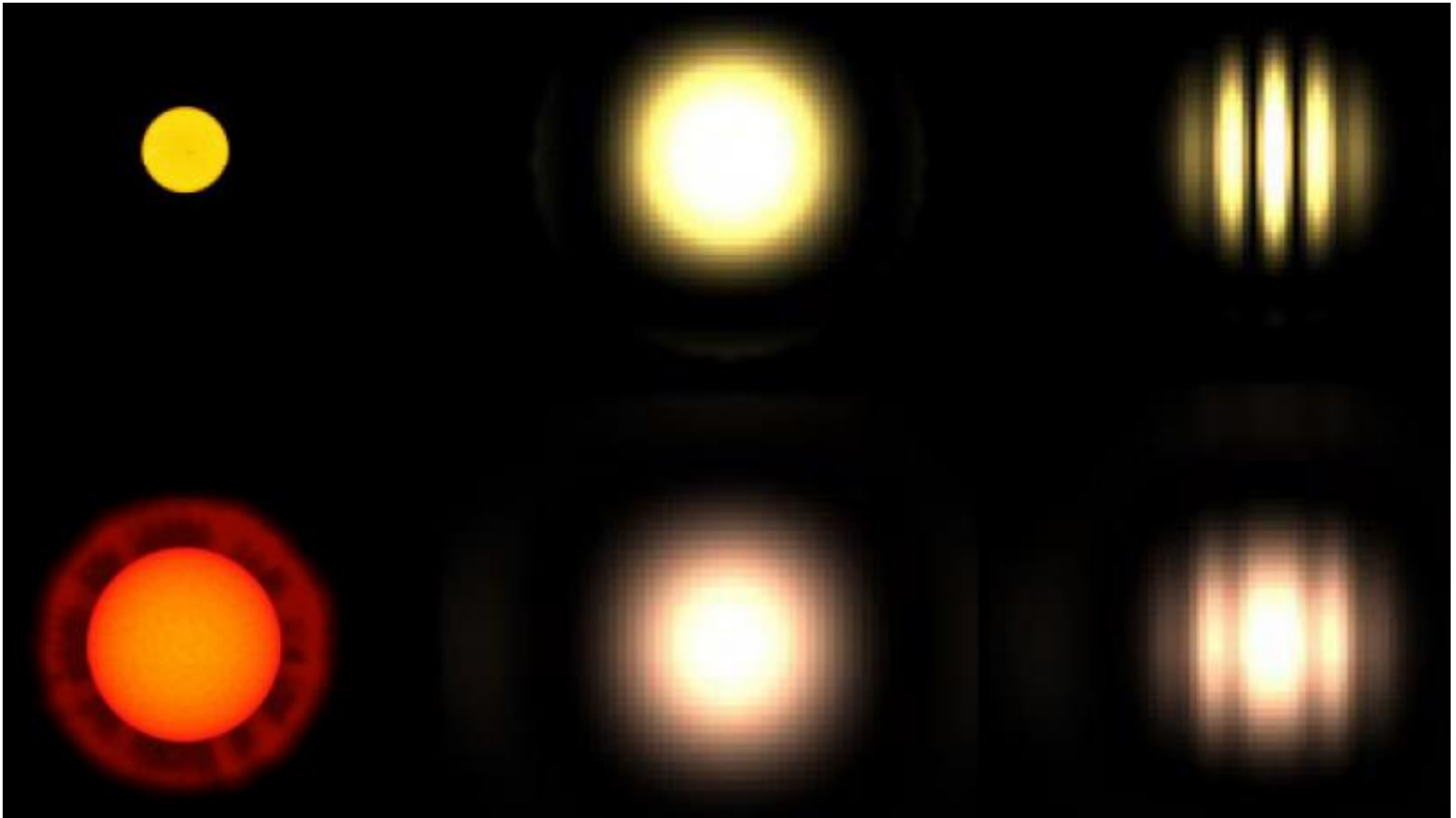
$$\text{Maxima: } D = \frac{n\lambda}{y}$$

- Schärfe des Interferenzmusters
→ Größe des Sternes



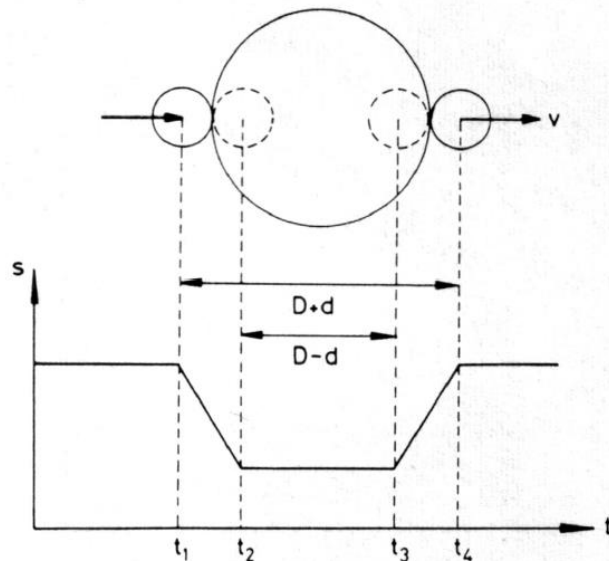
Michelson- Sterninterferometer

Vergleich der Interferenzbilder verschieden großer Sterne



Bedeckungsveränderliche

- Bei Doppelsternsystemen
- Voraussetzungen
 - Kleiner Stern ($\varnothing = d$) umkreist großen ($\varnothing = D$) mit Geschwindigkeit v
 - Ideal: Kreisbahn parallel zur Sichtlinie
 - System entfernt sich von der Erde mit Geschwindigkeit V



- Herangehensweise

- Bestimmung von V und v aus der Dopplerverschiebung
- Aus $v = \{V-v, V+v\}$ folgt eine Wellenlängenverschiebung zwischen $\Delta\lambda_1$ und $\Delta\lambda_2$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{V+v}{c} \quad \text{und} \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{V-v}{c}$$

Dies liefert:
$$v = \frac{c}{2} \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{\lambda_0}$$

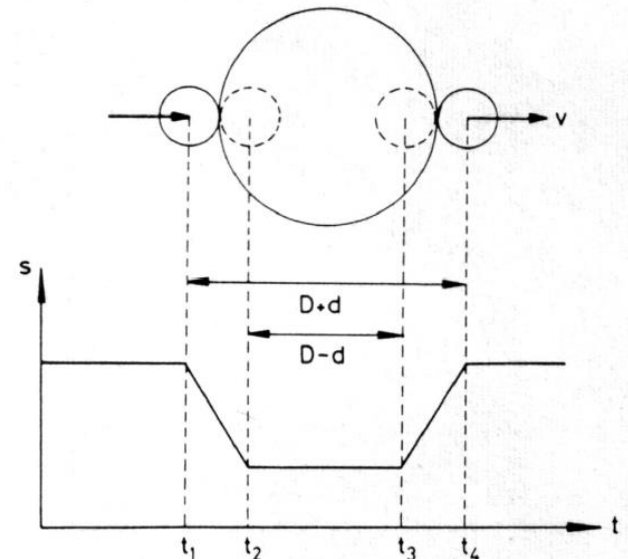
$$D + d = v(t_1 - t_4) \quad \text{und}$$

$$D - d = v(t_3 - t_2)$$

Woraus folgt:

$$d = \frac{v}{2} [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)]$$

$$D = \frac{v}{2} [(t_4 - t_1) + (t_3 - t_2)]$$

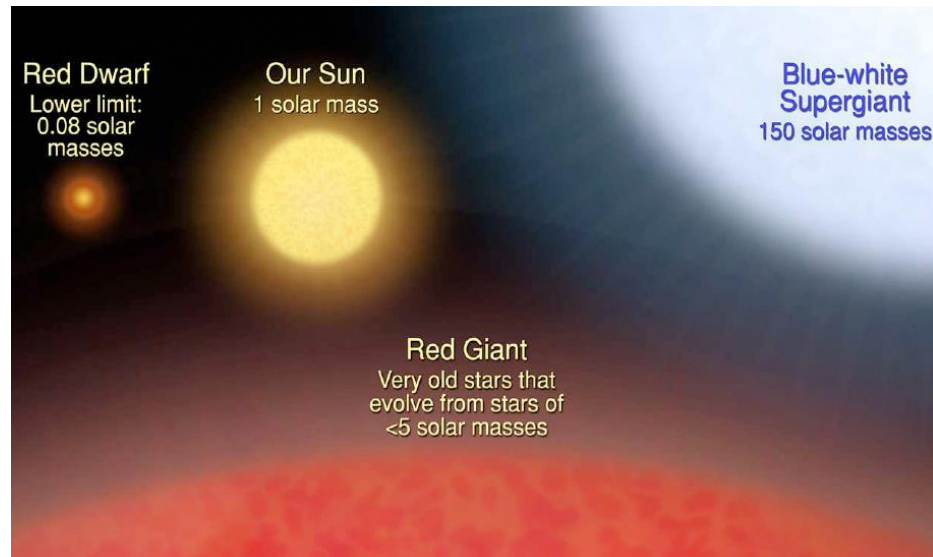


Aber:

- In den meisten Fällen ist die Kreisbahn nicht parallel zur Sichtlinie
- Zeiten t_1, \dots, t_4 nicht genau bestimmbar
- Durchgang nicht durch die „Mitte“ des großen Sterns
 - Weiterer geometrischer Parameter
- Insgesamt auch hier die Anzahl der geeigneten Systeme relativ gering

Typische Sternradien

- Neutronensterne $R \sim 10km$
- Weiße Zwerge $R \sim 0,01R_{\odot}$
- Sonnenähnliche Sterne $R \sim 0,5 \dots 10R_{\odot}$
- Rote Riesen $R \sim 20 \dots 100R_{\odot}$
- Überriesen $R \sim 100 \dots 1000R_{\odot}$



Effektivtemperatur

- Theoretische Größe
- Über Leuchtkraft und Radius bestimmbar
- Annahme: Stern ist nahezu schwarzer Strahler

$$F_{bol} = \sigma T_{eff}^4$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstante

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$$

Effektivtemperatur

Gesamtstrahlungsstrom durch die Oberfläche eines Sterns:

$$F(R) = \frac{L}{4\pi R^2}$$

Effektivtemperatur:

theoretische Temperatur eines gleichgroßen schwarzen Strahlers mit selber Strahlungsleistung.

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T_{eff}$$

Effektivtemperatur

- nur Annäherung:
 - Stern kein idealer schwarzer Strahler
 - > Mitte-Rand-Verdunklung
 - > Fraunhofer-Linien im Emissionsspektrum
 - Nur für äußere Schichten (Sternatmosphäre)

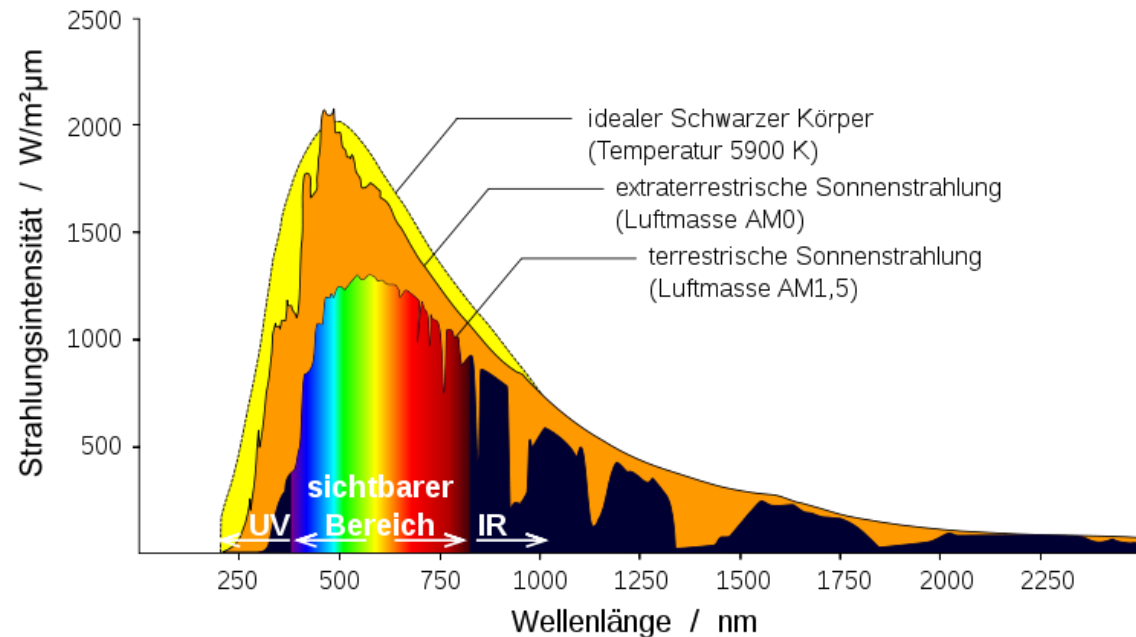


Abbildung 3: Strahlungsintensität der Sonne

Effektivtemperatur

Messung:

- Wien'sches Verschiebungsgesetz:

Maximum der Strahlungsleistung bei λ_{max}

$$\lambda_{max} = \frac{2.90 \cdot 10^{-8} K \text{ nm}}{T_{eff}}$$

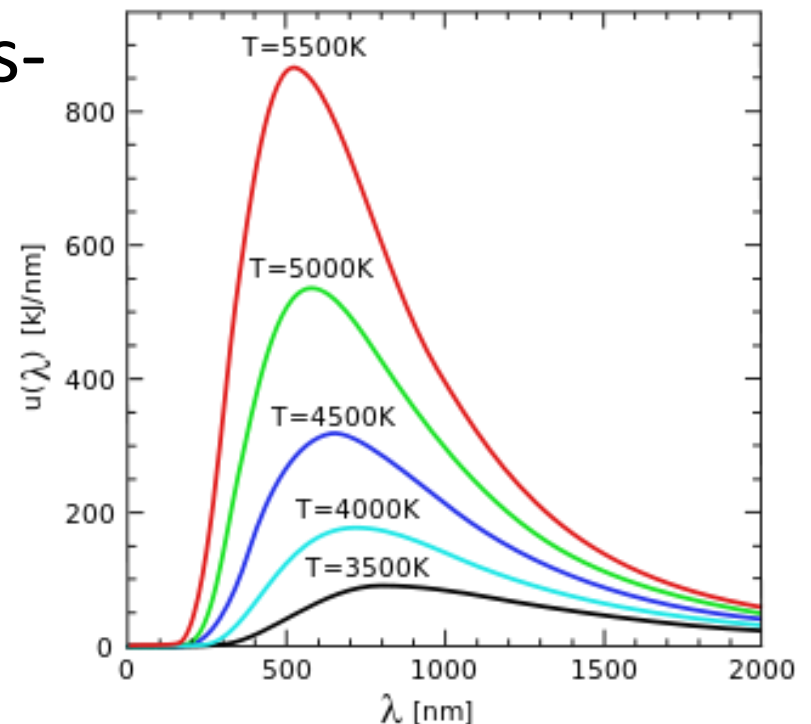


Abbildung 4: Wien'sches Verschiebungsgesetz

Effektivtemperatur

- Stärke der Absorptionslinien im Sternenspektrum abhängig von der Temperatur

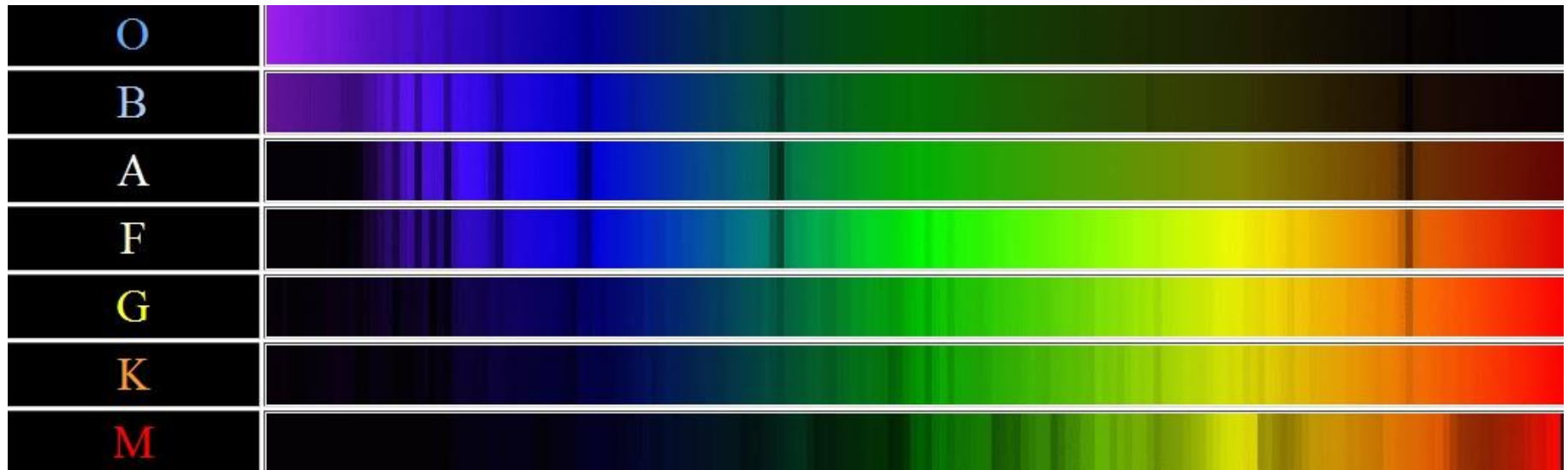


Abbildung 5: Absorptionslinien für Sterne unterschiedlicher Temperatur (Spektralklasse)

Masse

- Bestimmung aus der Bewegung von Doppelsternsystemen
- Vorgehensweise:

3. Keplersches Gesetz: $P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1+m_2)} a^3$ (a = Große Halbachse der Schwerpunktsbewegung)

$$(m_1 + m_2) = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2}$$

$$\frac{(m_1 + m_2)}{M_\odot} = \frac{(a/1AE)^3}{(P/1Jahr)^2}$$

Sind die großen Halbachsen bekannt, so folgen

$$\frac{a_1}{a} = \frac{m_2}{m_1+m_2} \quad \text{und} \quad \frac{a_2}{a} = \frac{m_1}{m_1+m_2}$$

woraus man $\frac{m_1}{m_2}$ und $m_1 + m_2$ erhält

Chemische Zusammensetzung

- Großteil der Masse eines Sterns wird von Wasserstoff und Helium gestellt
- Metalle ($A > 4$) tragen nur einen kleinen Anteil zur Masse bei

Abkürzungen:

$$X = \frac{m(H)}{\sum_i m(i)} \quad Y = \frac{m(He)}{\sum_i m(i)} \quad Z = \frac{m(A > 4)}{\sum_i m(i)}$$

$$X + Y + Z = 1$$

Metallizität

- Verhältnis der Häufigkeit von Eisen in einem Stern im Vergleich zu der Häufigkeit in der Sonne

$$\left[\frac{Fe}{H} \right] = \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{star} - \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{sun}$$

$$\left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{sun} = \frac{1}{31000} = 3.2 \cdot 10^{-5}$$

Chemische Zusammensetzung

- Betrachten der Absorptionslinien
- Vergleich mit theoretischen Modellen (Simulation des Strahlungstransports)

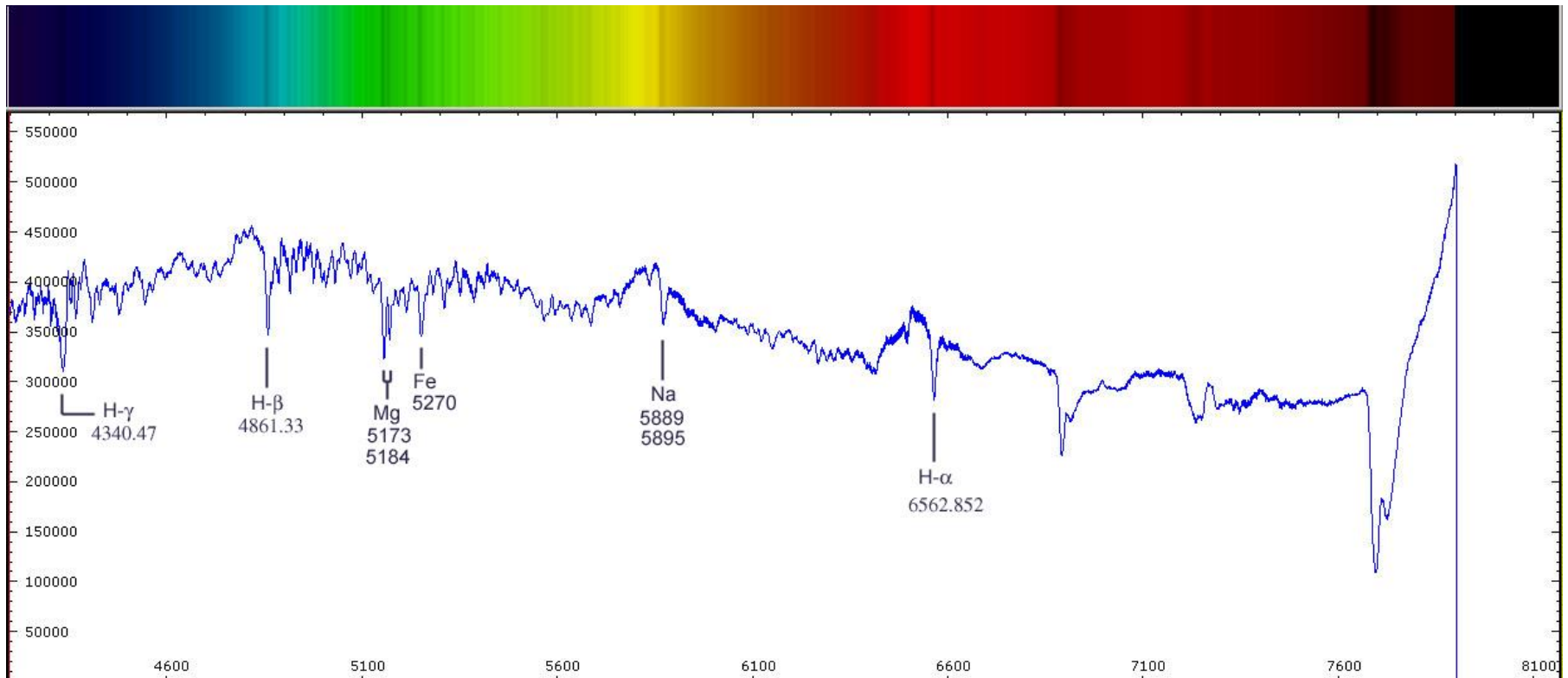


Abbildung 6: Spektrum der Sonne

Masse-Leuchtkraft-Beziehung

- Gültig nur für Hauptreihensterne

$$\left(\frac{L_{star}}{L_{sun}}\right) = \left(\frac{M_{star}}{M_{sun}}\right)^{3.5}$$

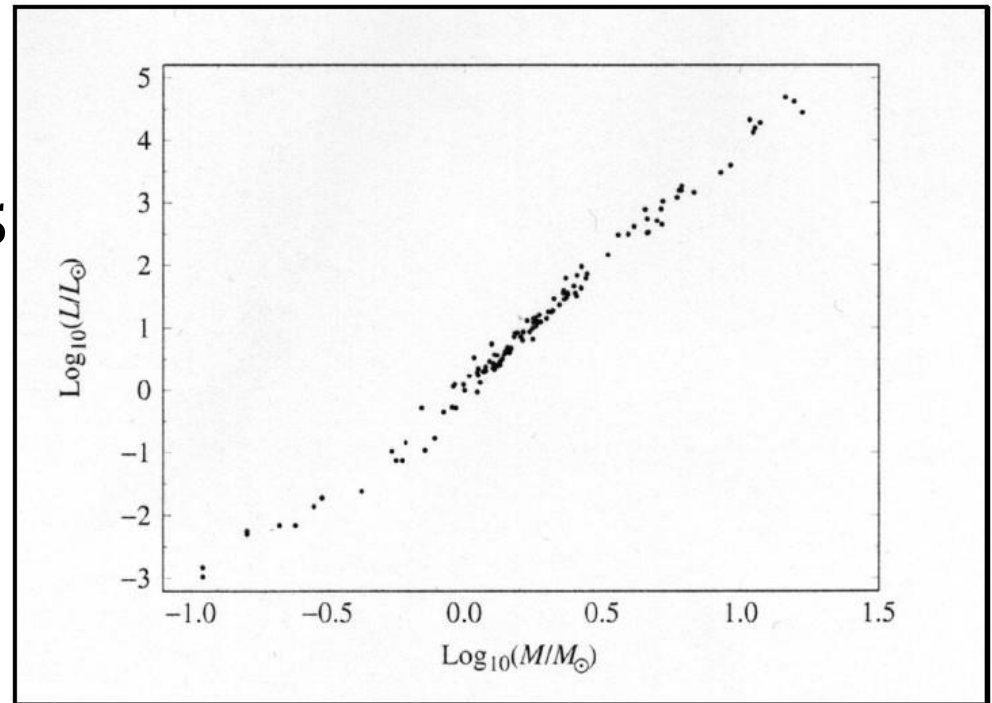


Abbildung 7: Masse-Leuchtkraft- Beziehung; Steigung = 3.5

Hertzprung-Russell-Diagramm

- Relation von effektiver Temperatur (bzw. Spektralklasse/Farbe) eines Sterns und seiner Leuchtkraft

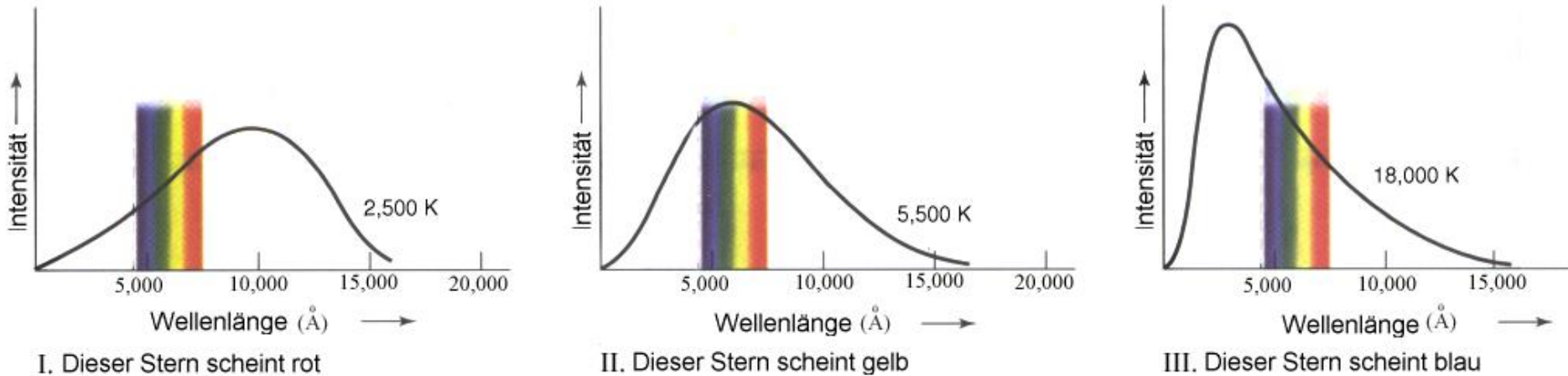


Abbildung 8: Farbe des Sterns in Abhängigkeit der Temperatur

Hertzsprung-Russell-Diagramm

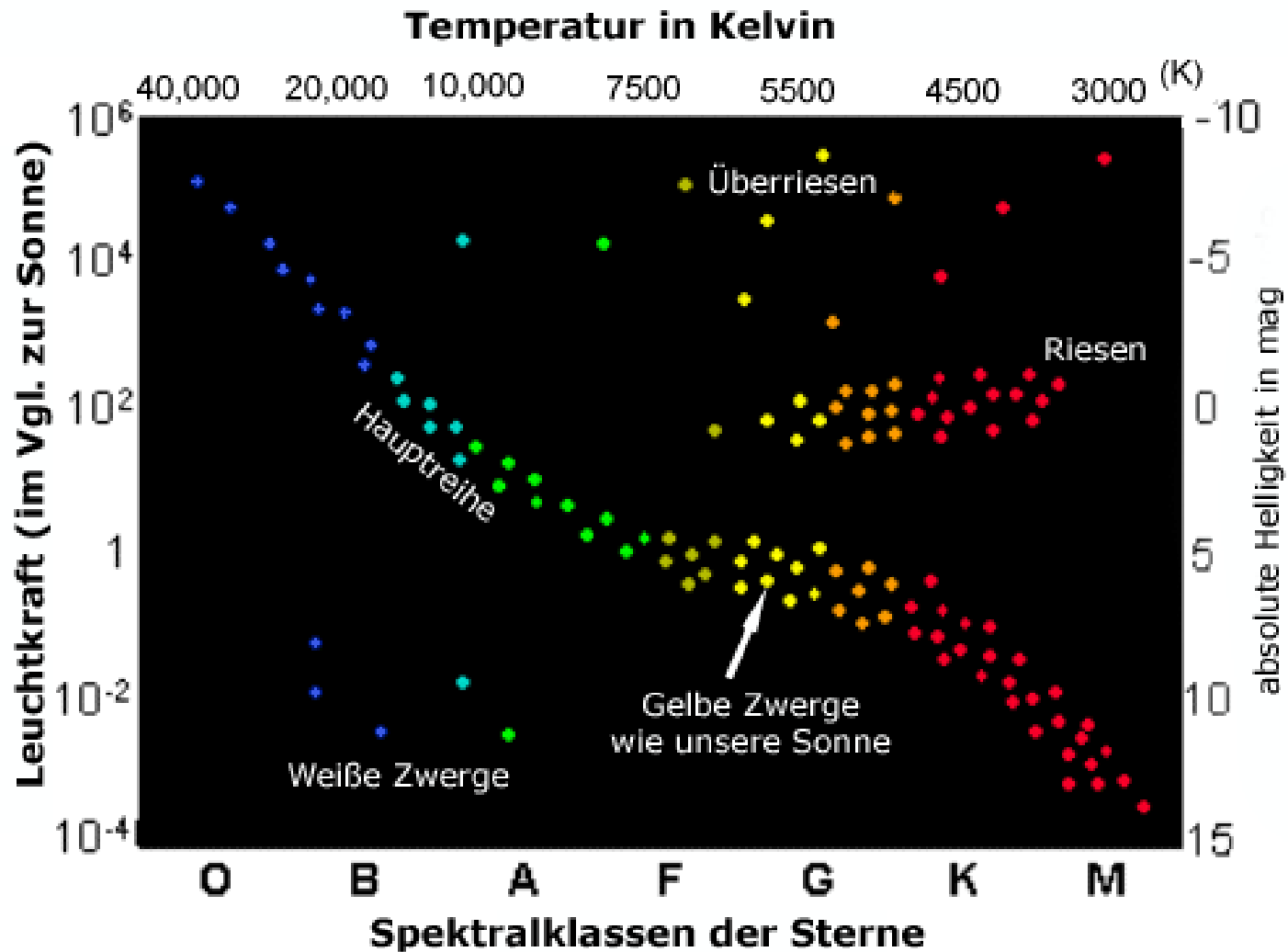


Abbildung 9: Hertzsprung-Russell-Diagramm

Hertzsprung-Russell-Diagramm

HR-Diagramm in 4 Bereiche aufteilbar:

- Hauptreihe
- Riesenast
- Gebiet der Überriesen
- Gebiet der weißen Zwerge

Hertzsprung-Russell-Diagramm

Zeigt auch die Entwicklung eines Sterns mit zunehmendem Alter

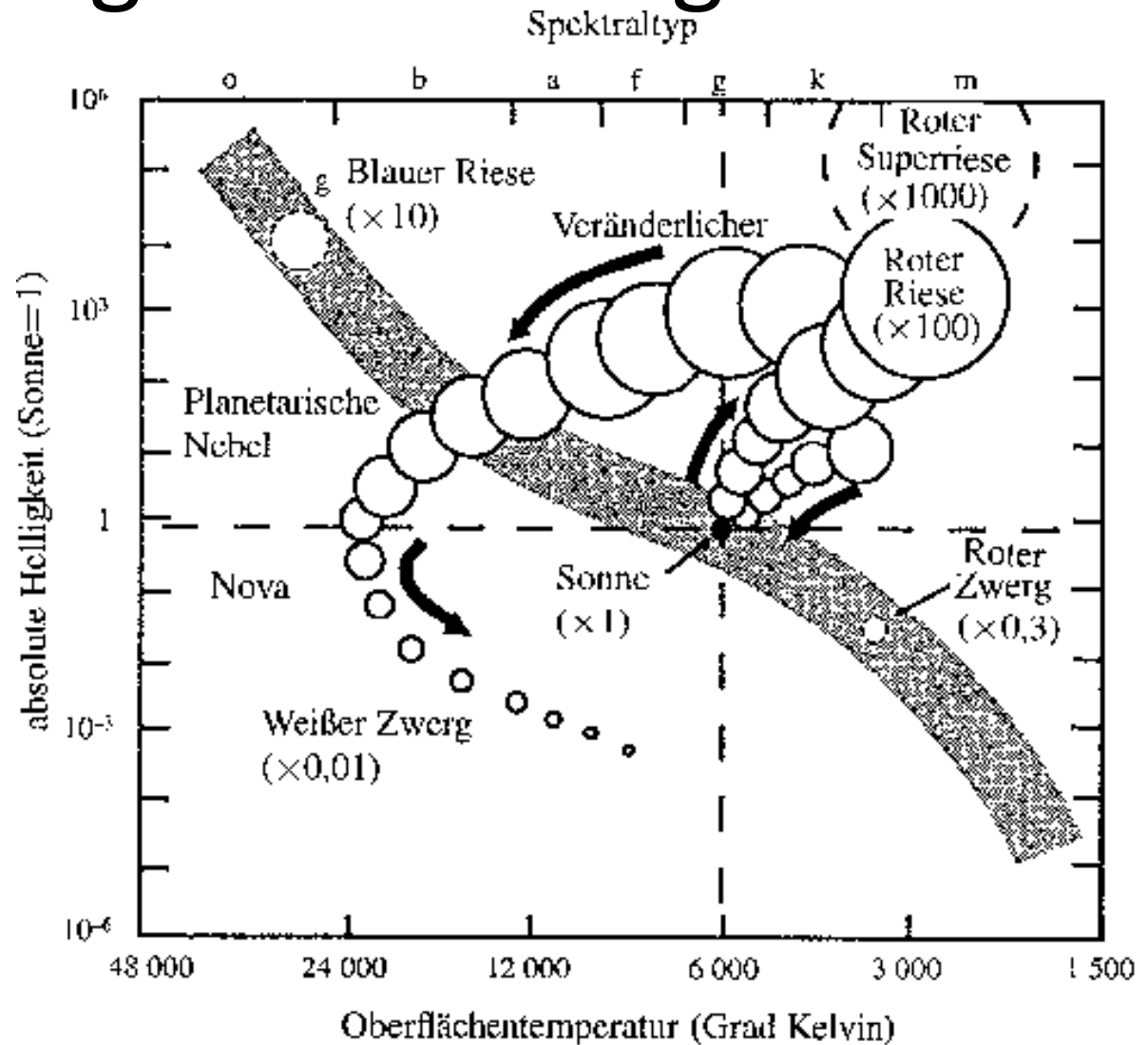


Abbildung 10: Hertzsprung-Russell-Diagramm; Entwicklung der Sonne

Quellenverzeichnis

- http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/Zustandsgroessen.pdf
- <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS&page=background>
- <http://sebastiantempl.jimdo.com/2011/08/30/sternenlicht-lesen-iii-chemische-zusammensetzung/>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Metallizit%C3%A4t>
- <http://www.eso.org/public/>
- A. Weigert, H.J. Wendker: „Astronomie und Astrophysik – Ein Grundkurs“, Weinheim:VCH 1996

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: <http://lexikon.astronomie.info/sterne/sterne.html>
- Abbildung 2: <http://farawayworlds.files.wordpress.com/2010/02/sternparallaxe-1.gif>
- Abbildung 3: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Sonne_Strahlungsintensitaet.svg
- Abbildung 4: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Wiens_law.svg/330px-Wiens_law.svg.png
- Abbildung 5: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/umwelt_technik/12sternentw/spektralklassen.htm
- Abbildung 6: http://igss.wdfiles.com/local--files/the-sun-s-continuous-spectrum/solar_spectra_graph.jpg
- Abbildung 7: Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie: „An Introduction to Modern Astrophysics“, Reading: Addison Wesley Company 1996, S. 212
- Abbildung 8: <http://docs.kde.org/development/de/kdeedu/kstars/ai-colorandtemp.html>
- Abbildung 9: <http://www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/foto/hrd-sloan-digital-sky-surve.gif>
- Abbildung 10: <http://www.bertramkoehler.de/Abb1.gif>