

Astro121 - Einführung in die Astronomie

Sterne – Klassifikation II

Prof. Frank Bigiel

Argelander-Institut für Astronomie

Spektroskopie

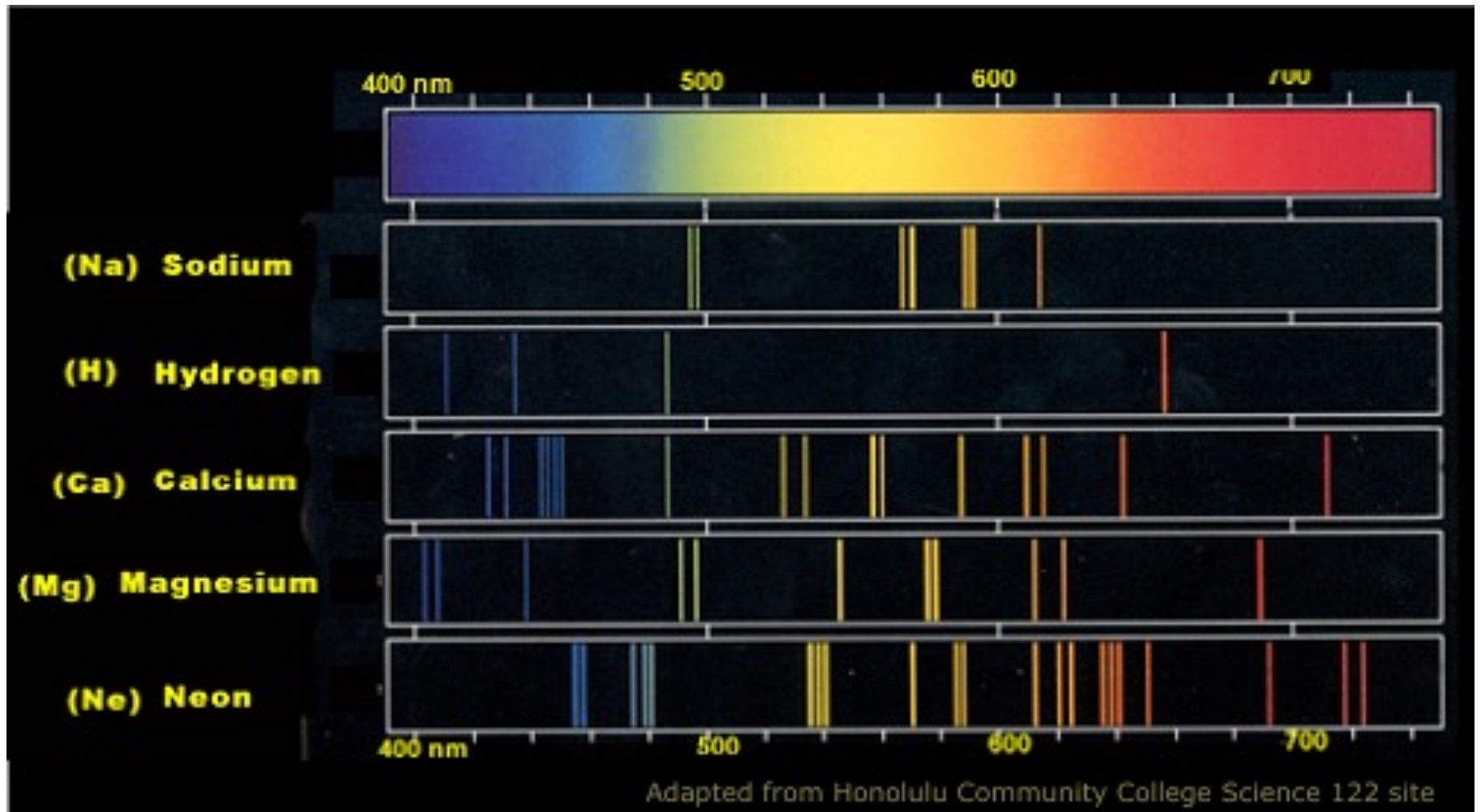
Spektrum und Fraunhoferlinien

- **Joseph Ritter von Fraunhofer** (1787-1826) erstellte als erster ein Verzeichnis von dunklen Linien im Spektrum der Sonne. Insgesamt 567 solcher Linien umfasst Fraunhofers Katalog, daher werden diese Linien noch heute als **Fraunhoferlinien** bezeichnet.
- Eine geringe Anzahl der von Fraunhofer notierten Linien entstehen in der Erdatmosphäre. Sie sind identifizierbar durch ihre Intensitätsvariation als Funktion des Sonnenstands und der nicht nachweisbaren Dopplerverschiebung aufgrund der solaren Rotation.
- Heute sind mehr als 22.000 Fraunhoferlinien bekannt

Fraunhofer



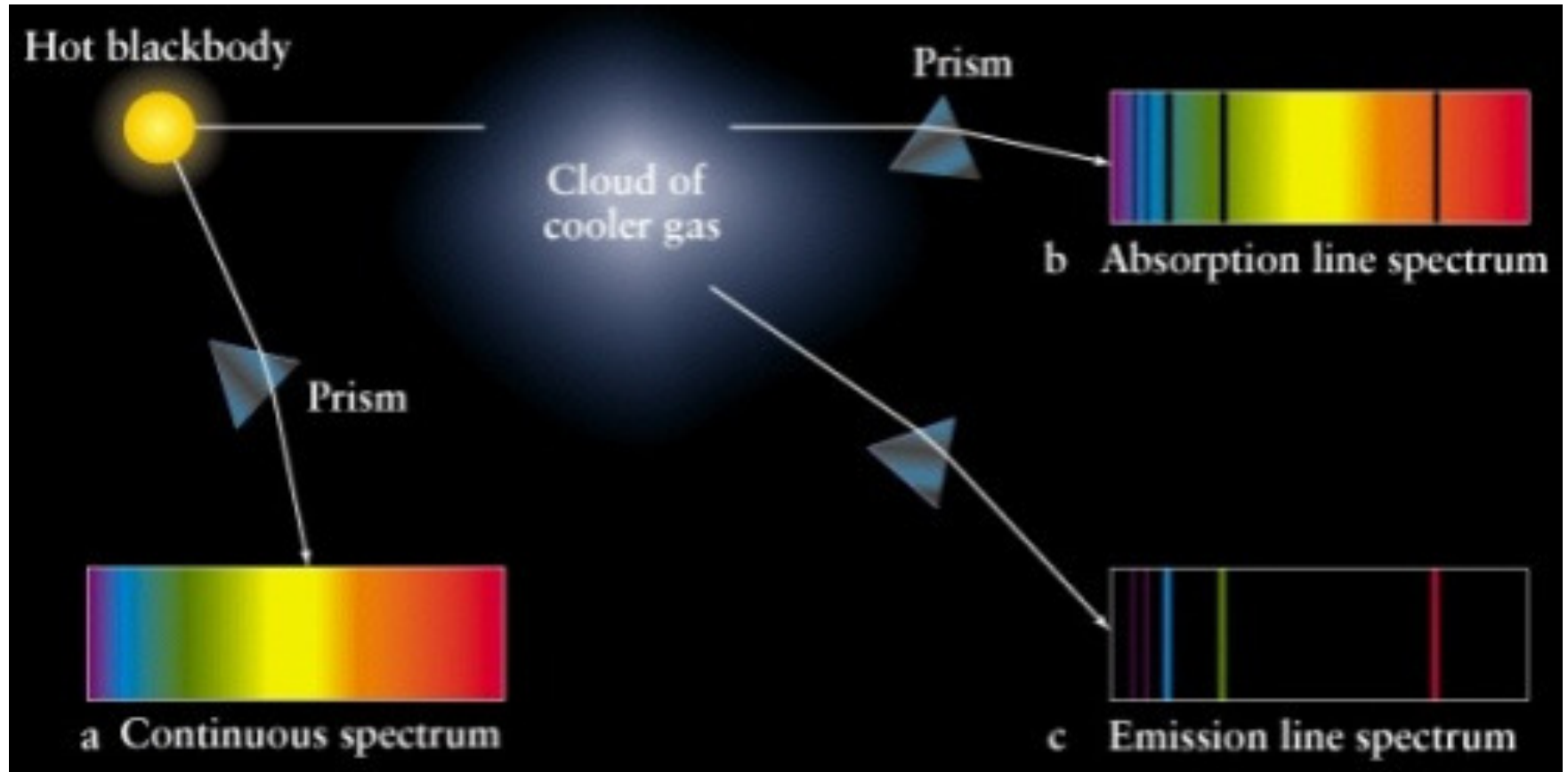
Spektren: Wiederholung



Wiederholung: Entstehung der Linien

- Fraunhoferlinien lassen sich im Laborexperiment erzeugen, indem das Licht einer Lichtquelle durch ein Gas hindurch beobachtet wird. Beobachtet werden dunkle Linien (**Absorptionslinien**) die charakteristisch sind für die **chemischen Elemente** aus denen das Gas sich zusammensetzt. Wird die Lichtquelle ausgeschaltet, so wandeln sich die dunklen Linien in helle Linien um (Emissionslinien).
- Bei den Fraunhoferlinien handelt es sich um so genannte **resonante Absorption**. Dies bedeutet, dass nicht beliebige Linien in Emission oder Absorption beobachtet werden können. Auch ist die Stärke der Absorption unabhängig von der Strahlungsintensität der Lampe. **Alleine ihr Spektrum (Farbe) und chemischen Elemente bestimmen die Existenz und Sichtbarkeit der Absorptionslinien.**

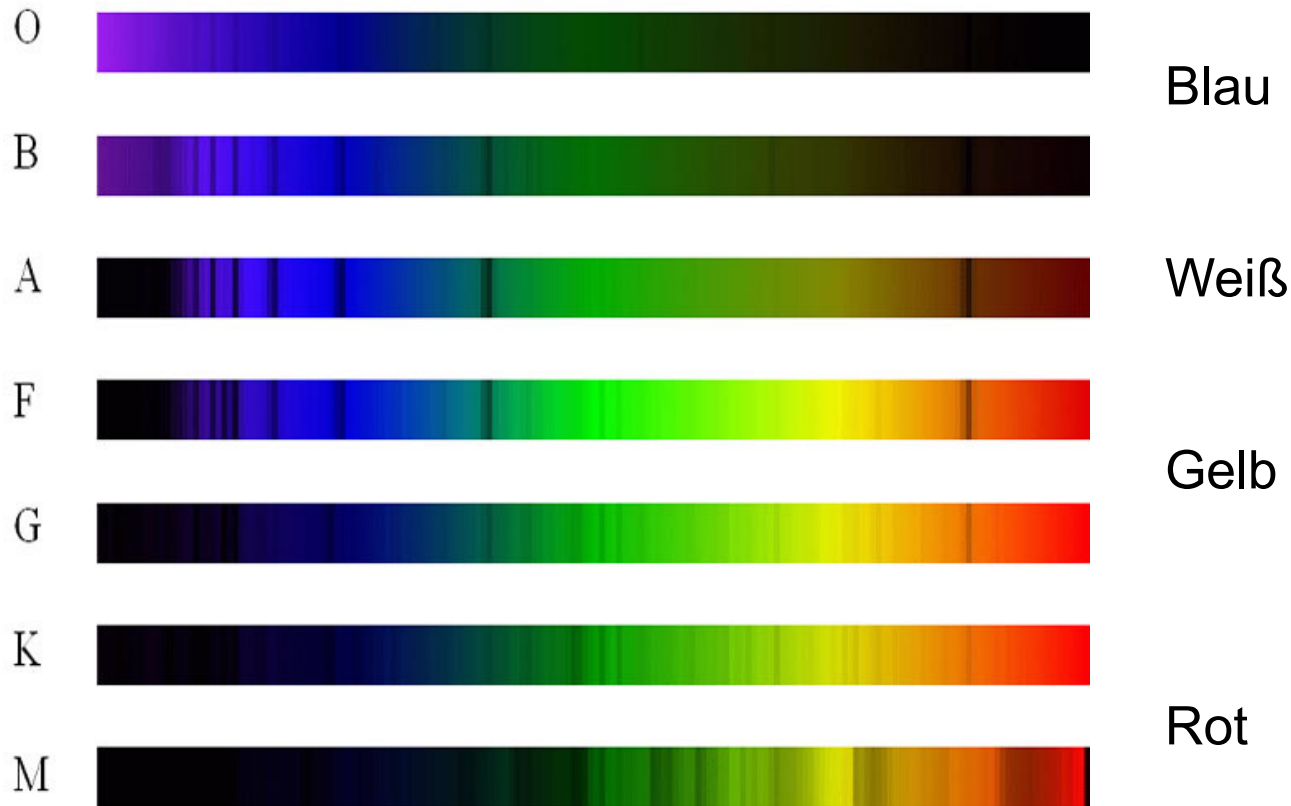
Spektren: Wiederholung



Spektren statt Farben

□ Spektral-Klassifikation

- Zu unterschiedlichen Farben gehören charakteristische Spektrallinien



<http://www.mgf-kulmbach.de/material/gk/sterne/spektralklasse.htm>

Hertzprung-Russel Diagramm (HRD)

Spektren statt Farben

□ Spektral-Klassifikation

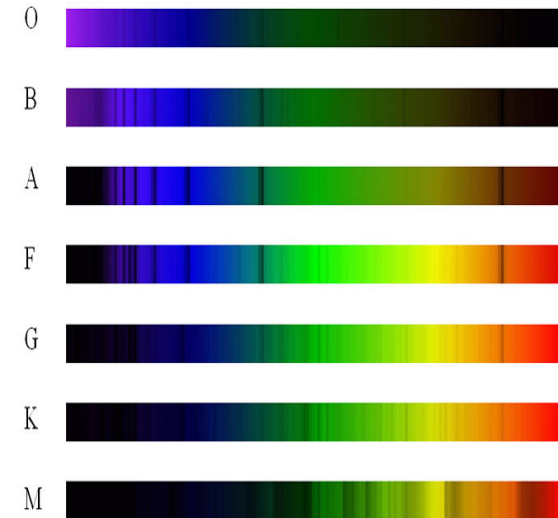
- nach Edward Pickering (1846-1919), Wilhelmina Fleming (1857-1911), Annie Cannon (1863-1941)
- -> Harvard-Klassifikation von Sternspektren:
 - ❖ Sequenz von Spektren,
 - ❖ korreliert mit Sternfarbe, Farb-Index (also Temperatur)
- Basis des Henry-Draper Catalog (1880-1925)
 - ❖ Untersuchung von 225.000 Sternen
- Hertzsprung-Russell-Diagramm, kurz HRD
 - ❖ wurde 1913 von Henry Norris Russell entwickelt und baut auf Arbeiten von Ejnar Hertzsprung auf
 - ❖ Spektraltyp gegen absolute Leuchtkraft auftragen
 - ❖ Später auch Temperatur gegen Leuchtkraft

Spektraltyp-Beschreibung

❑ Wichtigste Typen (blau – rot)

- **O-Sterne:** Linien hoch ionisierter Atome wie He II, Si IV, N II dominieren; kaum Wasserstofflinien
- **B-Sterne:** He II fehlt, dafür Wasserstofflinien, Si III und O II stark
- **A-Sterne:** Wasserstofflinien sowie Si II stark, noch schwache Linien von Fe II, Ti II, Ca II
- **F-Sterne:** Wasserstoff schwächer als beim A-Stern, starke Ca II Linien, Linien von weiteren ionisierten Metallen wie Fe II, Ti II im Maximum
- **G-Sterne:** Ca II stark, Linien neutraler Metalle treten auf
- **K-Sterne:** Wasserstoff relativ schwach, neutrale Metalle stark, erste Molekülbanden
- **M0-Sterne:** Linien von neutralen Atomen, z.B. Ca aber auch Molekülbanden z.B. von TiO
- **M5-Sterne:** Kalzium-Linien sind stark und TiO Banden

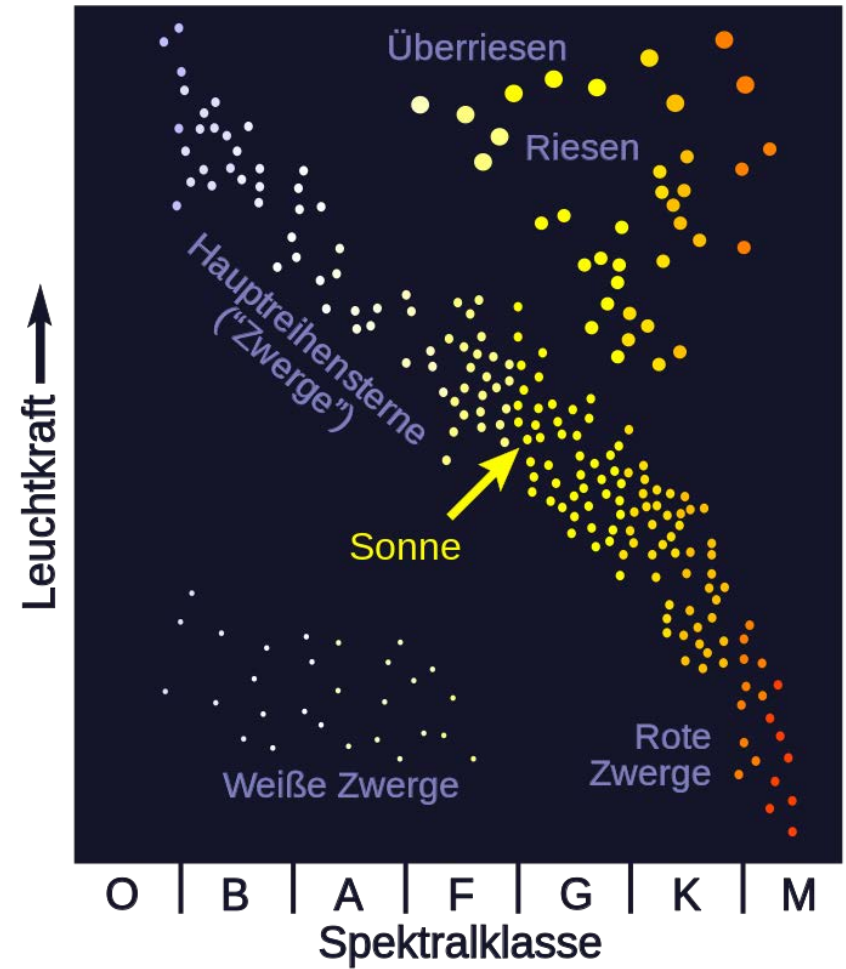
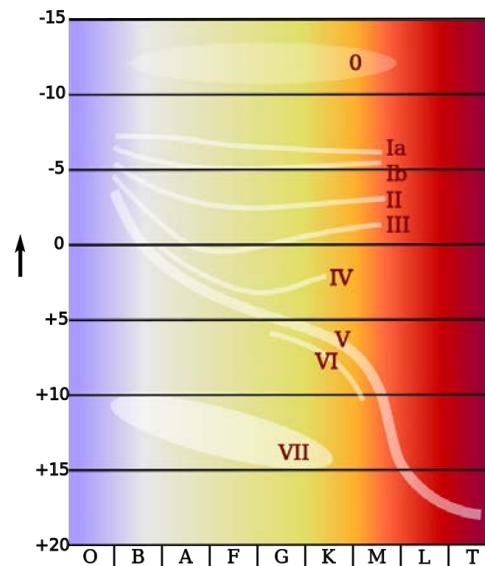
❑ Unterteilung in jeweils 10 Stufen von 0-9: B0, B1, ..., B9, A0, A1,...



Leuchtkraftklassen

❑ Verschiedene Helligkeitsklassen bei gleichem Spektraltyp (Farbe)

- I: Überriesen
- II-III: Riesen
- IV: Unterriesen
- V: Zwerge (Hauptreihe)
- VI: Unterzwerge
- VII: Weiße Zwerge



<http://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm>

Sterntypen

☐ Hauptreihe (Zwerge)

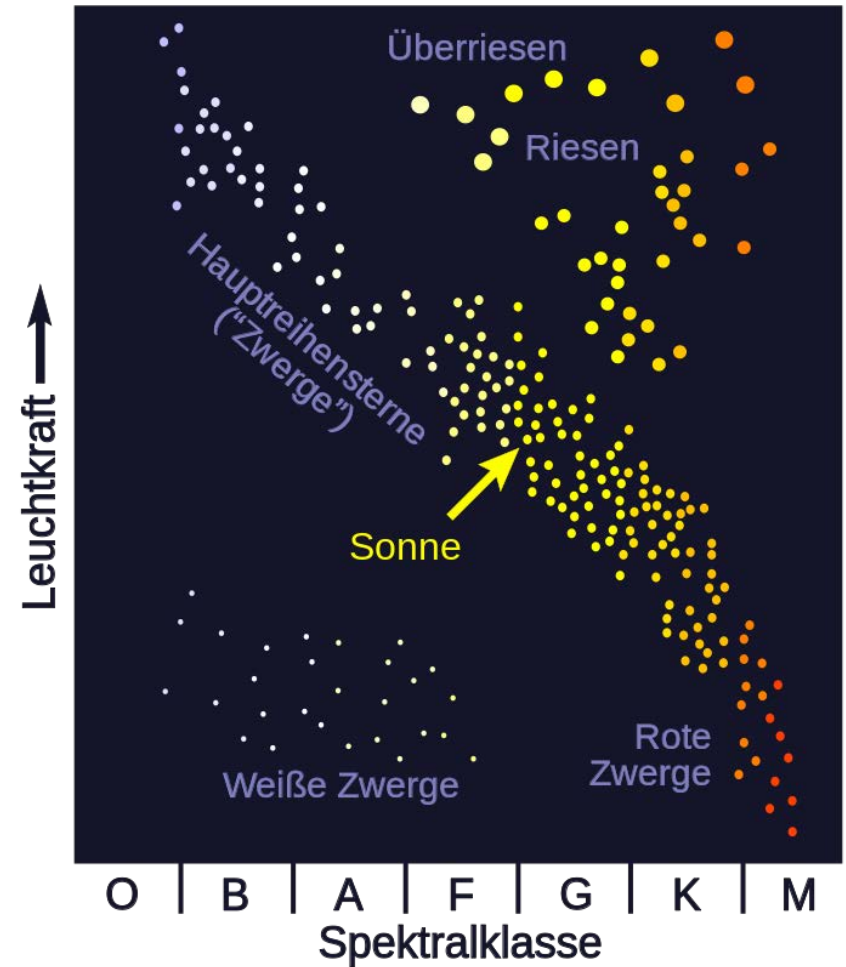
- Normale Sterne
- O,B,A-Sterne
 - ❖ Massereich
 - ❖ Kurzlebig
- F,G,K-Sterne
 - ❖ Sonnenähnlich
- M-Sterne
 - ❖ Kleine, schwache Sterne
- T, L (Braune Zwerge)
 - ❖ Keine Kernfusion

☐ Riesen

- Sehr groß und hell
- Spätes Entwicklungsstadium

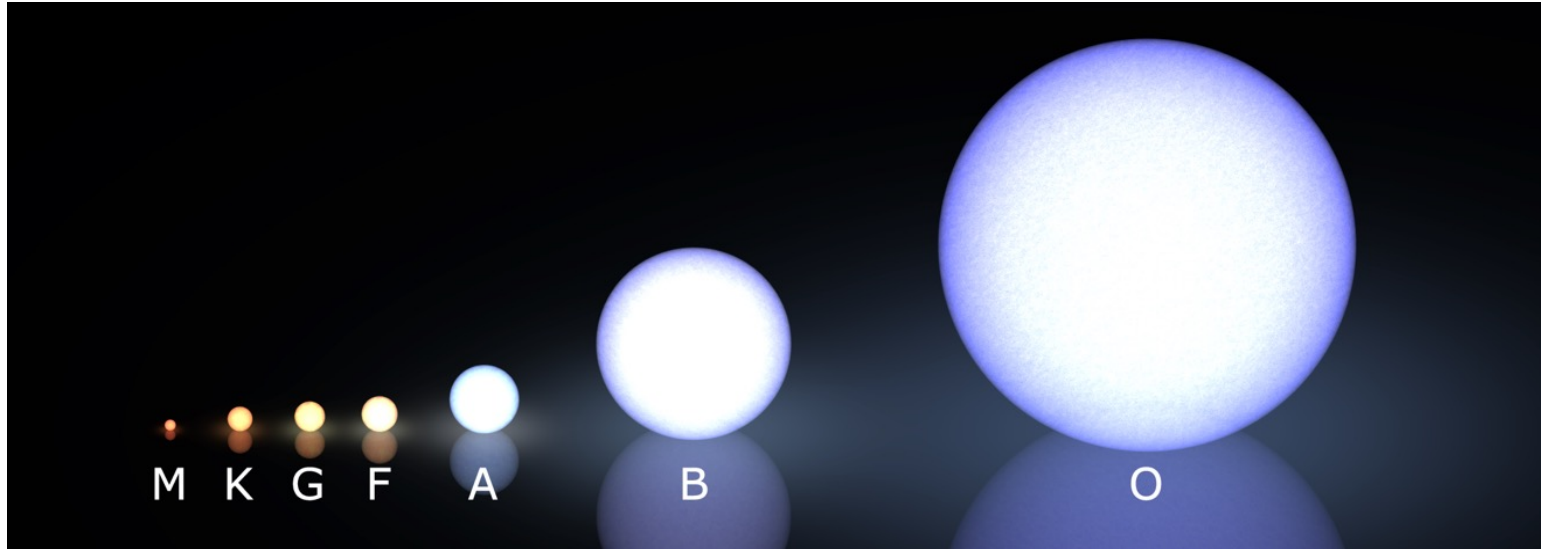
☐ Weiße Zwerge

- Sternleichen



Gedächtnishilfen

□ Spektralklassen auf der Hauptreihe



O Be A Fine Girl, Kiss Me (Like That)!

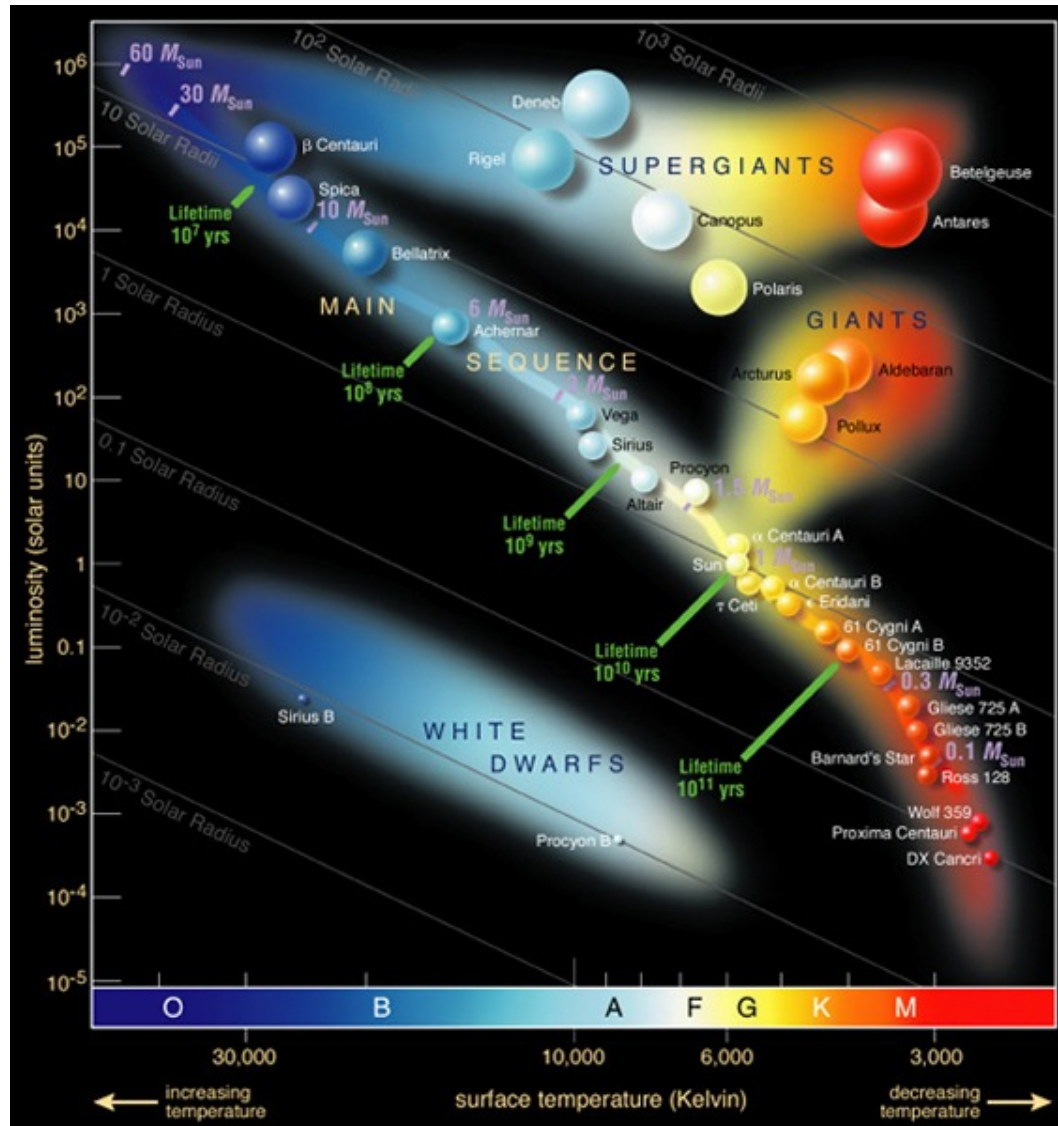
Historische Version mit moderner Erweiterung um L und T-Zwerge
(die mangels Kernfusion keine Sterne sind!)

Deutsche Version

(Quelle: Wikipedia)

„Offenbar Benutzen Astronomen Furchtbar Gerne Komische Merksätze“

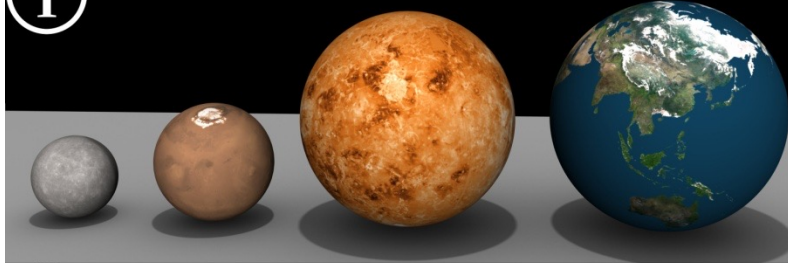
Das Hertzsprung-Russel Diagramm



Größenvergleiche

①

Mercury < Mars < Venus < Earth



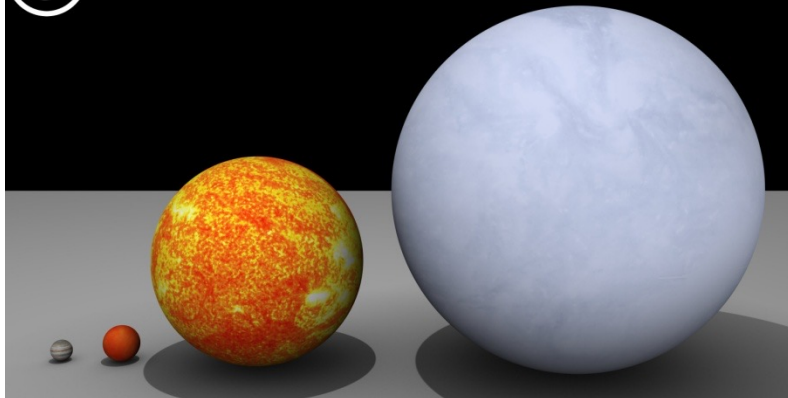
②

Earth < Neptune < Uranus < Saturn < Jupiter



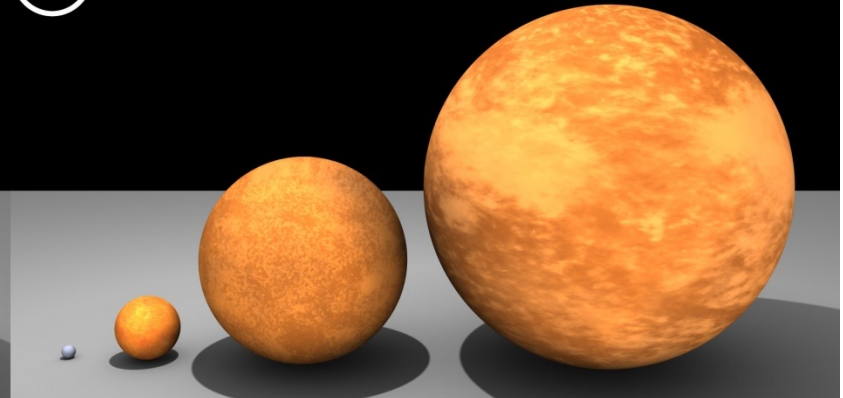
③

Jupiter < Wolf 359 < Sun < Sirius



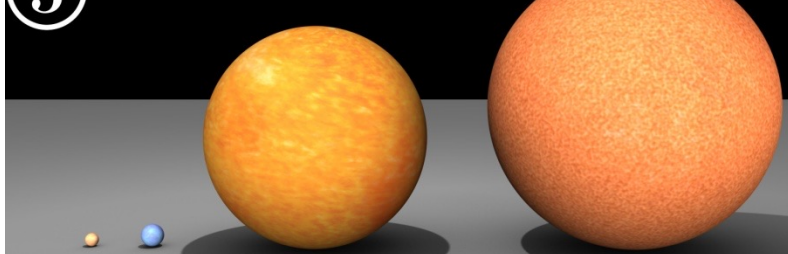
④

Sirius < Pollux < Arcturus < Aldebaran



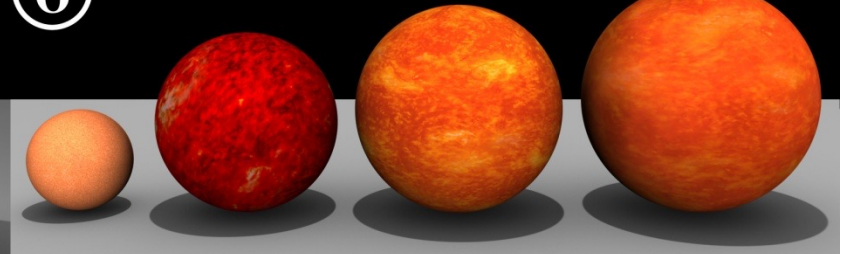
⑤

Aldebaran < Rigel < Antares < Betelgeuse



⑥

Betelgeuse < Mu Cephei < VV Cephei A < VY Canis Majoris

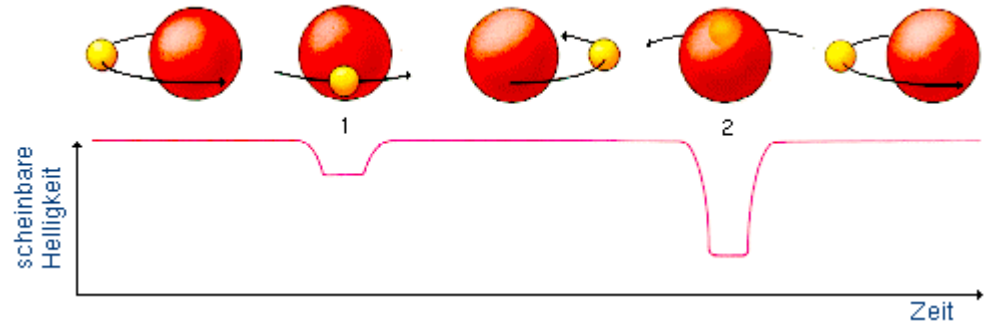


Mehrfach-Sternsysteme

Doppelsterne

- ❑ Gravitativ gebunden (Keplerbahn umeinander)
- ❑ 30% aller Sterne bilden Doppel-/Mehrfachsysteme
 - 80% der O-,B-Sterne, 20% der M-Sterne
- ❑ Doppelsterntypen
 - Visueller Doppelstern
 - ❖ Winkelabstand ist groß genug, um die Komponente mit optischen Mitteln zu trennen.
 - Astrometrischer Doppelstern
 - ❖ erscheint am Himmel als ein Punkt; die Doppelstern-Natur kann aber von seiner Bahn am Himmel abgeleitet werden.
 - Spektroskopischer Doppelstern
 - ❖ erscheint am Himmel als ein Punkt, die Doppelstern-Natur ist durch die Analyse des Spektrums feststellbar.
 - Bedeckungsveränderliche
 - ❖ zeigen einen Abfall in der Helligkeit, wenn Komponente mit geringerer Helligkeit die Sichtlinie passiert.

Bedeckungsveränderliche



☐ Beobachtungsgrößen:

- Umlaufperiode, Flächenverhältnisse der Sterne
- Radialgeschwindigkeiten

☐ -> Genaueste Kenntnis der Lichtkurve,

☐ -> Modellierung:

- Alle Systemparameter können bestimmt werden
- Entfernung, Massen, Bahngröße

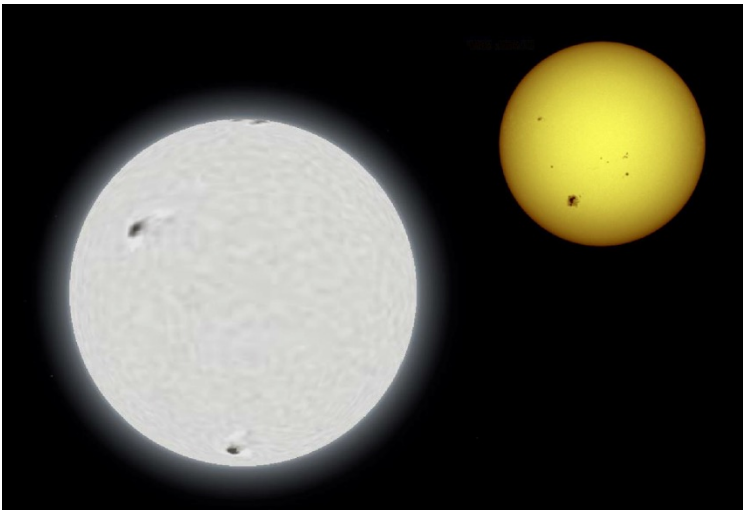
Doppelsterne

□ Sirius (Komponenten A+B; $\Delta m = 10 \text{ mag}$)

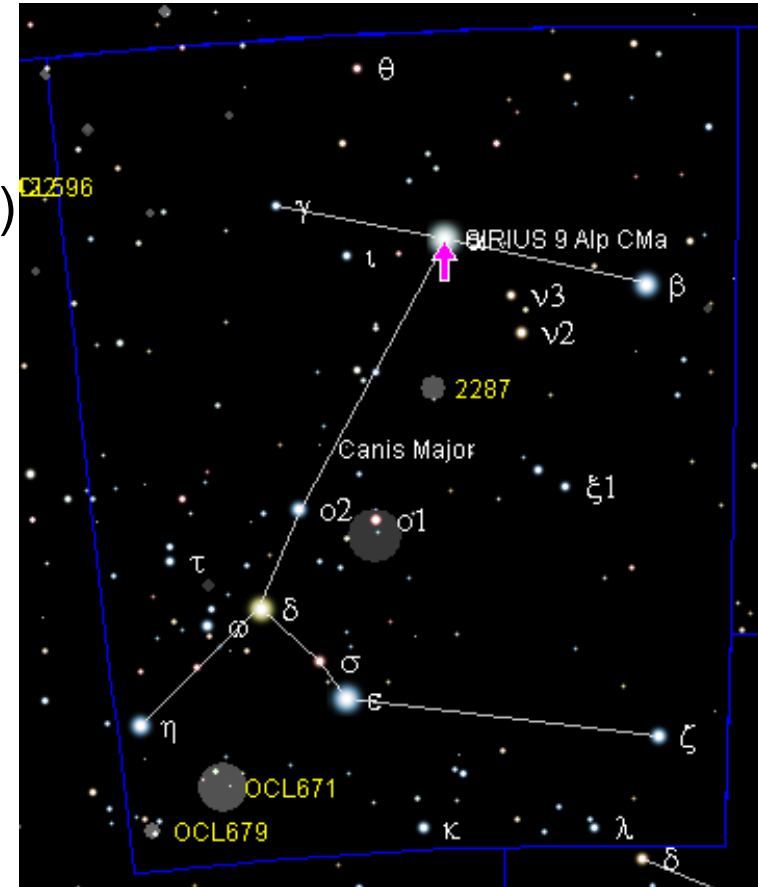
➤ A1 Hauptreihenstern und Weißer Zwerg

➤ Bahnparameter

- ❖ Periode 50 Jahre
- ❖ Große Halbachse $7,5''$ (=20 AE)
- ❖ Exzentrizität $e=0.59$
- ❖ Abstand 8 – 21,5 AE



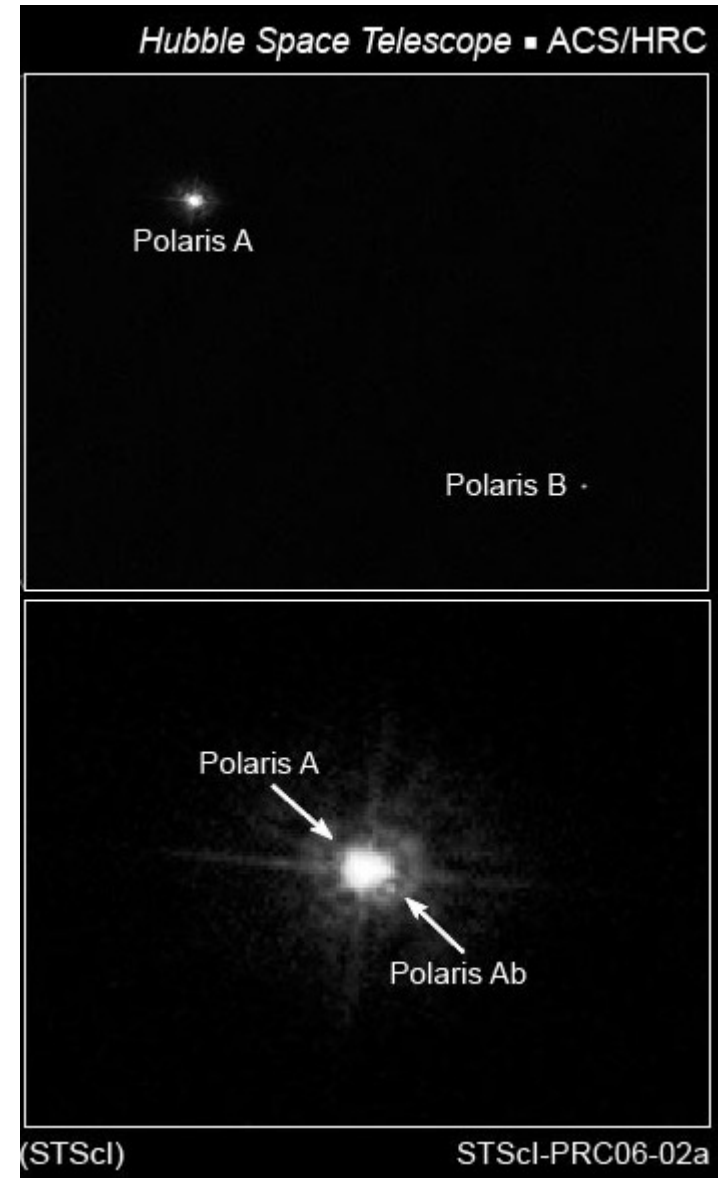
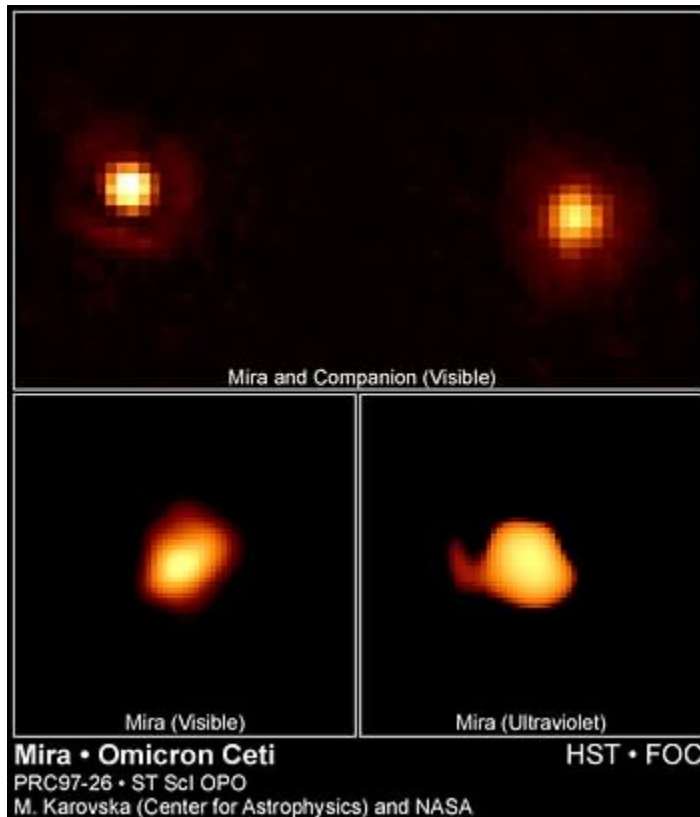
Größenvergleich: Sirius A - Sonne



Himmelskarte: Großer Hund

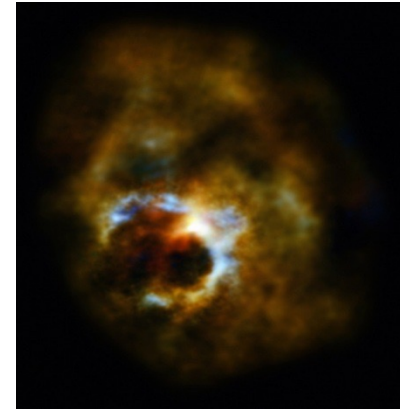
Mehrfachsysteme

- ❑ α -Centauri (3-fach)
- ❑ Polarstern (3-fach)
- ❑ Mira (Doppelstern)
 - Roter Riese und Weißer Zwerg

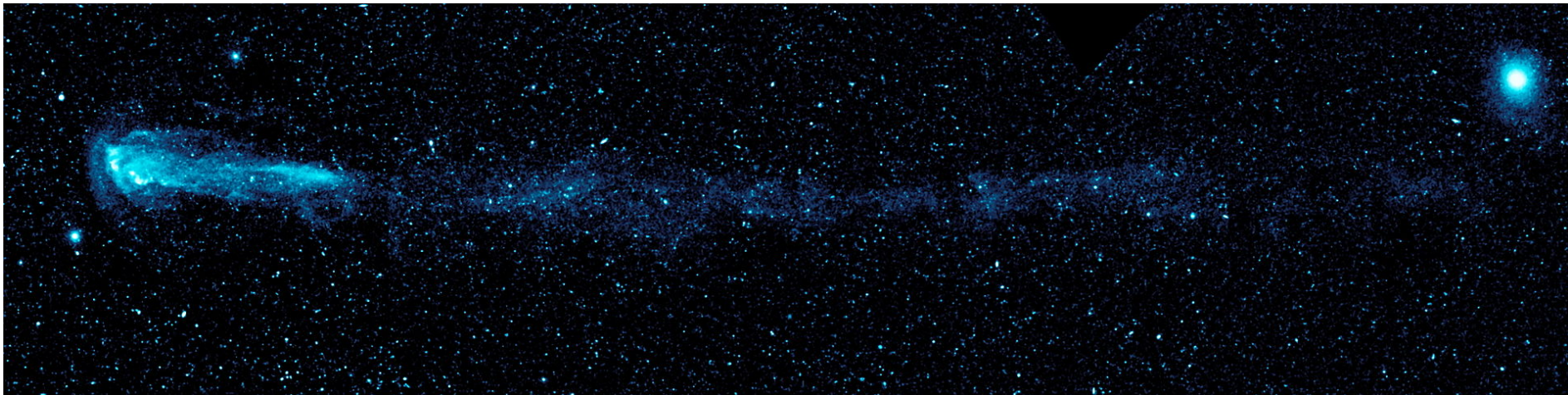


Eigenschaften von Mira

- Variable Helligkeit (sehr hell – unsichtbar)
- Ausgedehnte Hülle und Massenüberstrom zum Weißen Zwerg
- Weißer Zwerg wächst bis er kollabiert und als Supernova explodiert

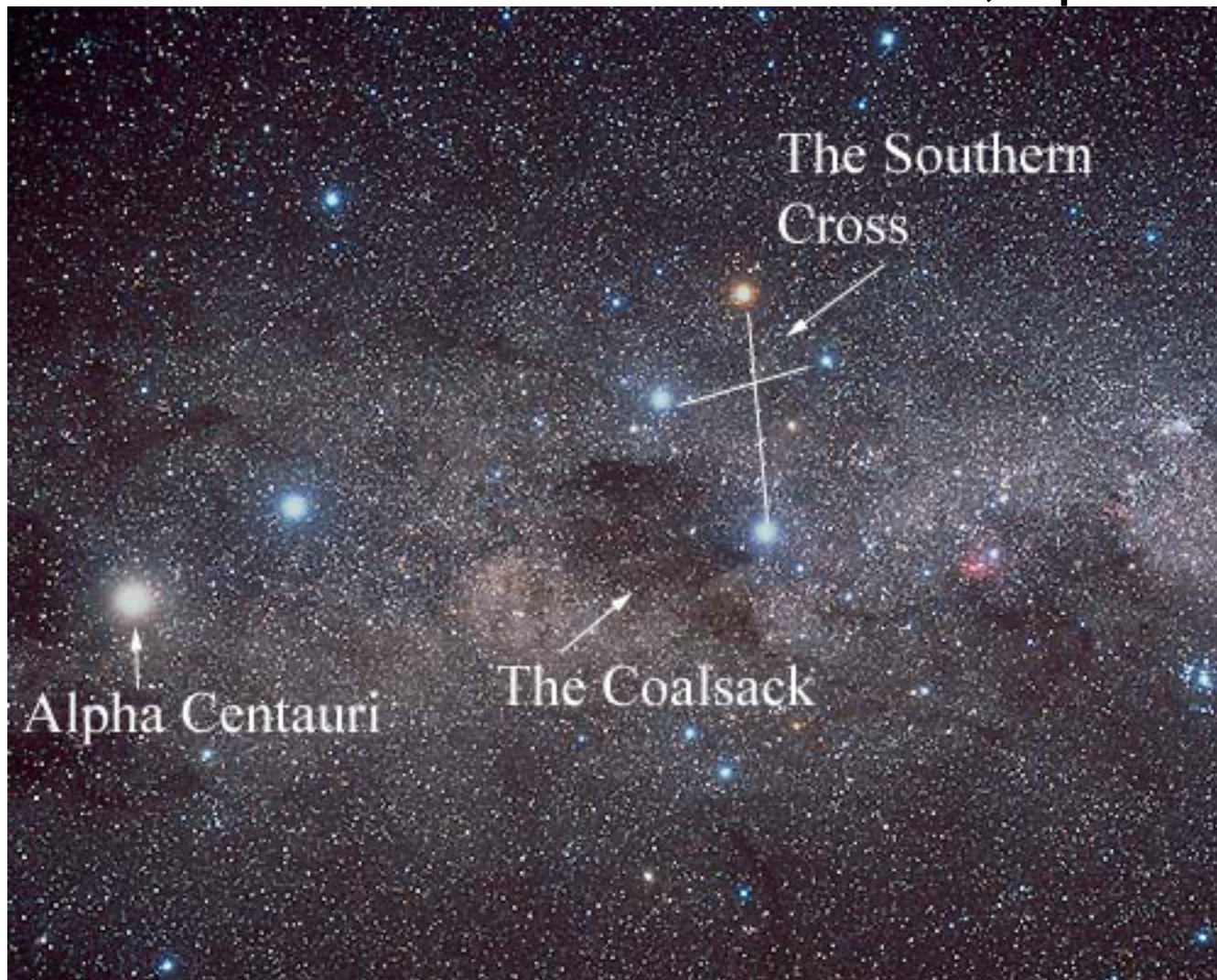


Mira: Hülle bei 900 μ m
Schweif im UV



Das α -Centauri Mehrfachsystem

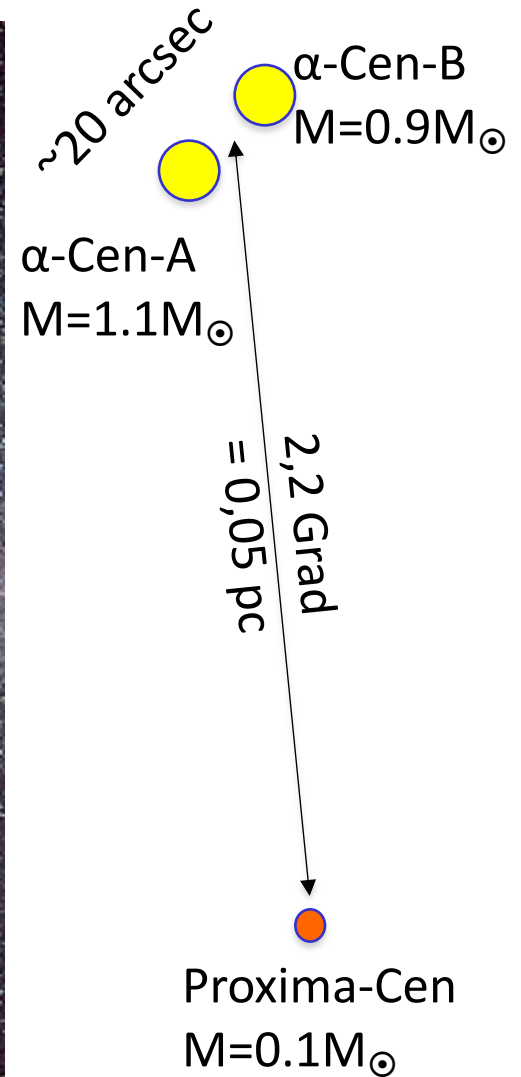
□ Die nächsten Sterne: $D = 1,3$ pc



Alpha Centauri

The Southern
Cross

The Coal Sack



Veränderliche Sterne

Veränderliche Sterne

□ Namen nach Prototypen

- Mira-Veränderliche: Mira im Walfisch
- δ -Cephei: Cepheiden

□ 3 Klassen von variablen Sternen

➤ Pulsationsveränderliche

❖ Pulsierende Einzelsterne

- Mira, Cepheiden, RR-Lyrae

➤ Bedeckungsveränderliche

❖ Doppelsterne (Bedeckungsveränderliche)

- Algol, Beta Lyrae

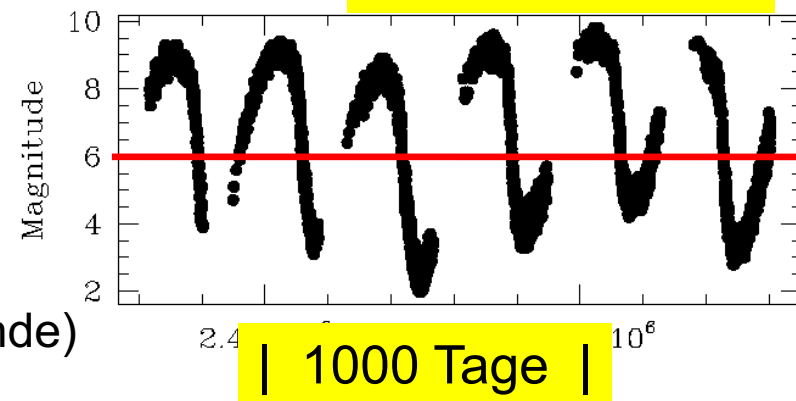
➤ Eruptionsveränderliche

❖ Ausbrüche

- Supernovae (1-malig)
- Novae (unregelmäßige Abstände)



Mira im Walfisch



Veränderliche Sterne im HRD

➤ Pulsationsveränderliche

❖ Lichtkurven und Perioden charakteristisch

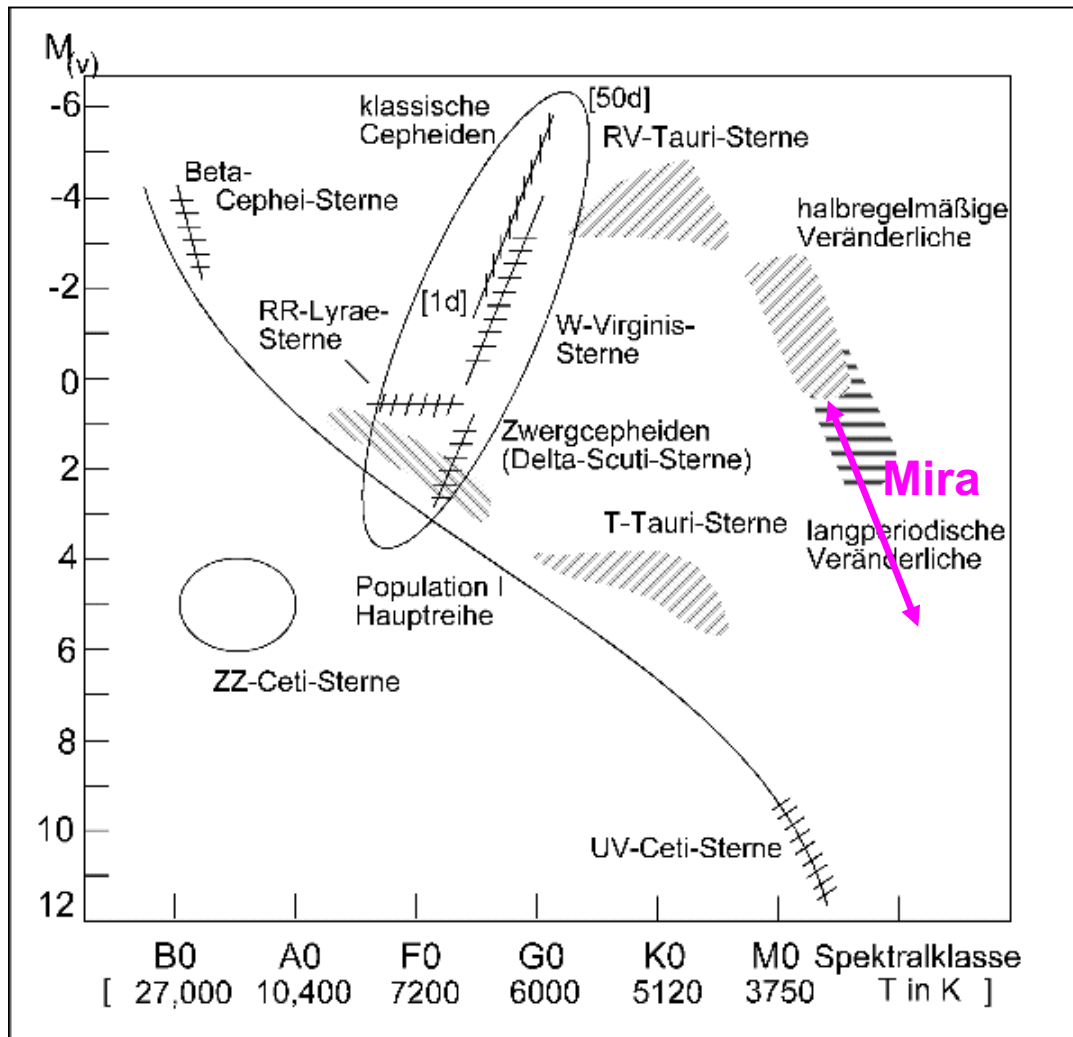
- **Mira** langperiodisch und unregelmäßig
- Mittleres $M_V = 1.7$
- $\Delta M_V = 5 \text{ mag}$
- $T_{\text{eff}} = 2900\text{--}3200 \text{ K}$

❖ Korrelation von Periode und Helligkeit für regelmässige Veränderliche

- Perioden-Leuchtkraft-Beziehung (P-L-Relation)



Entfernungsmessung



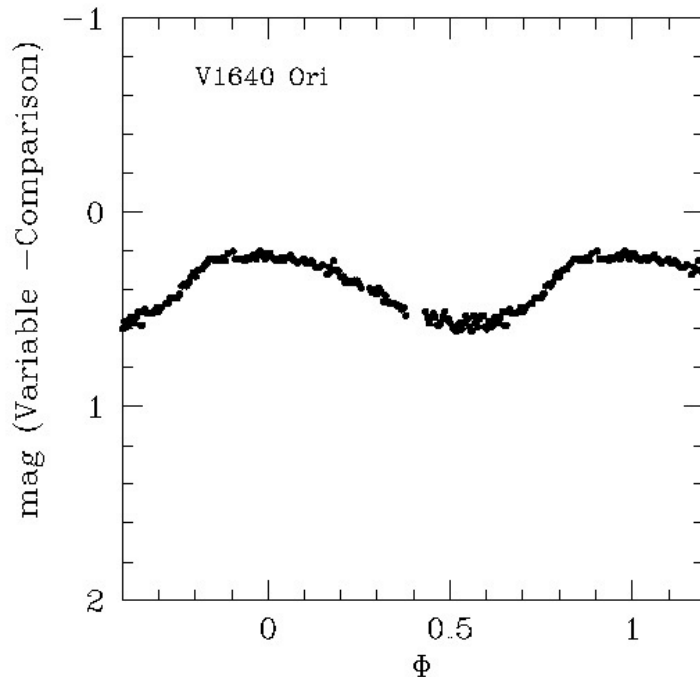
Veränderliche Sterne (P-L-Relation)



Wichtigste Typen

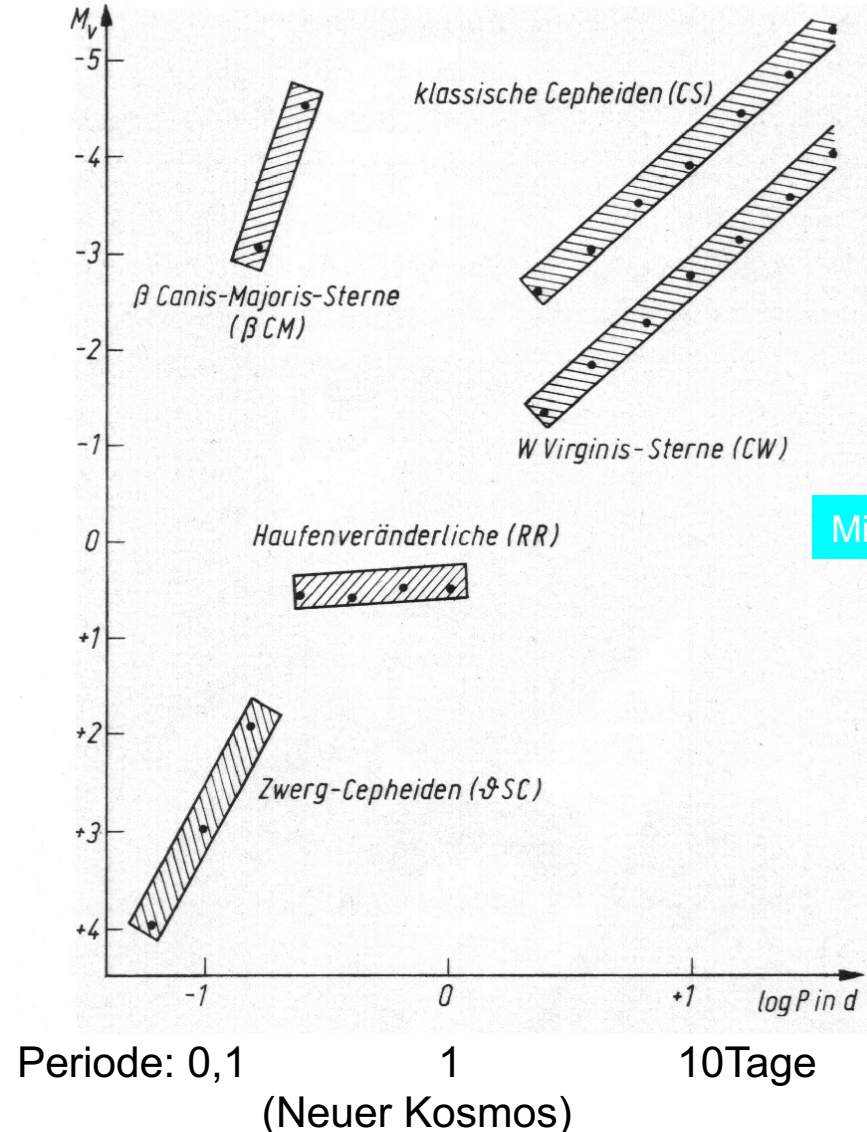
❖ **RR Lyrae** (Periode < 1 d)

■ Alte Metallarme Sterne



<http://www.astro.uni-bonn.de/~gmaintz/>

- Absolute Helligkeit
 $M_V \approx +0.5 \text{ mag}$
- **Entfernungsbestimmung**

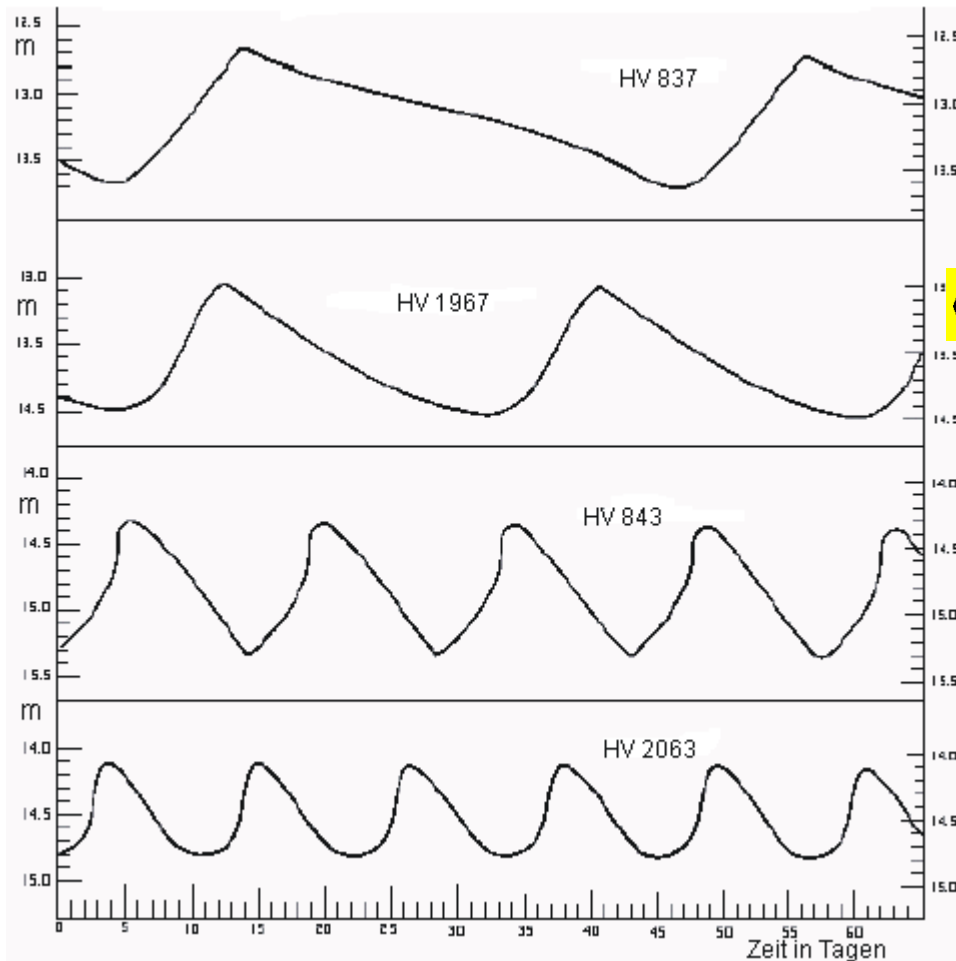


Mira

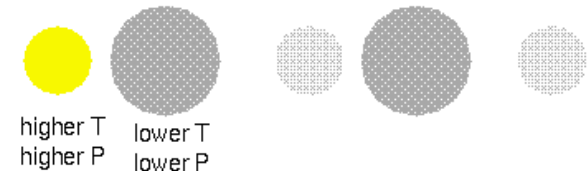
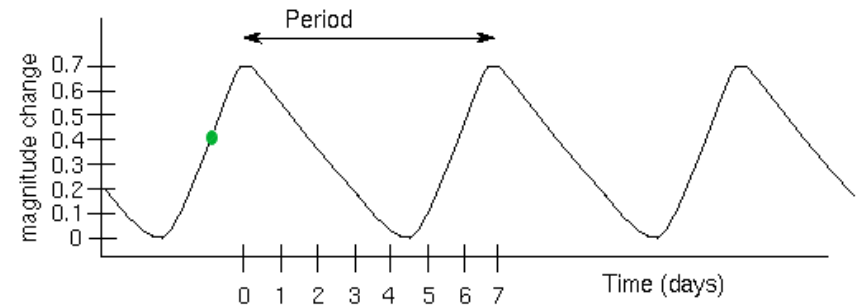
Veränderliche Sterne (P-L-Relation)

❖ **Cepheiden** (Periode $P = 1-50$ d)

- Massereiche metallreiche Sterne in später Entwicklungsphase
- Charakteristische Lichtkurve
- Periode-Helligkeits-Relation



$$\langle M_V \rangle = -3.53 \lg P + 2.13 \langle (B-V)_0 \rangle - 2.13$$



<http://www.astronomynotes.com/ismnotes/s5.htm>

http://www.leifiphysik.de/web_ph11_g8/grundwissen/16entfernung/cepheiden.htm

Masse-Leuchtkraft Beziehung

Masse-Leuchtkraft-Beziehung

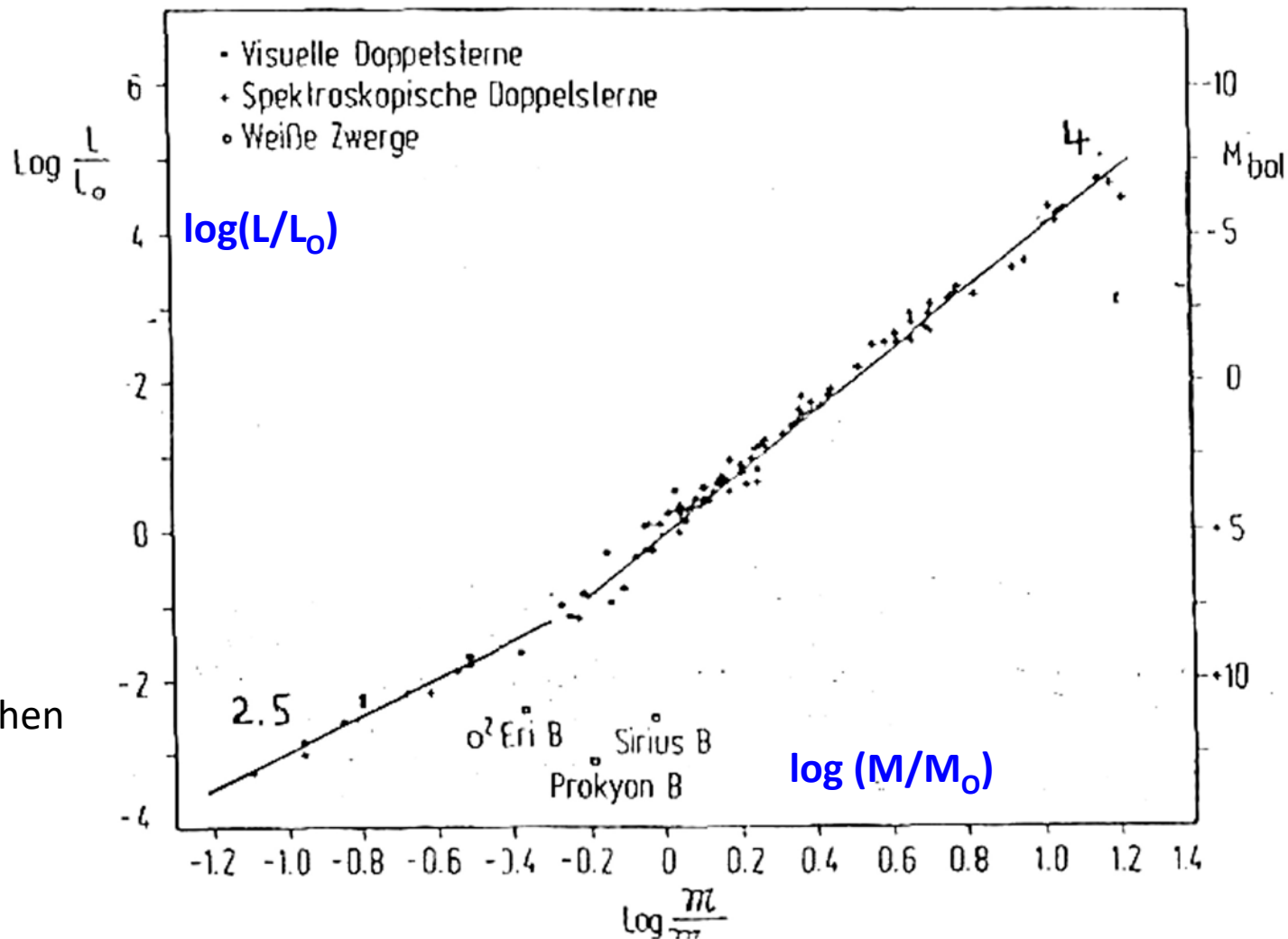
Empirisch:

Beobachtungsdaten
(nach Popper 1980):

Beste **Massen-**
bestimmungen aus

26 visuellen
Doppelsternen,
93 Bedeckungs-
veränderlichen,
4 spektroskopischen
Doppelsternen

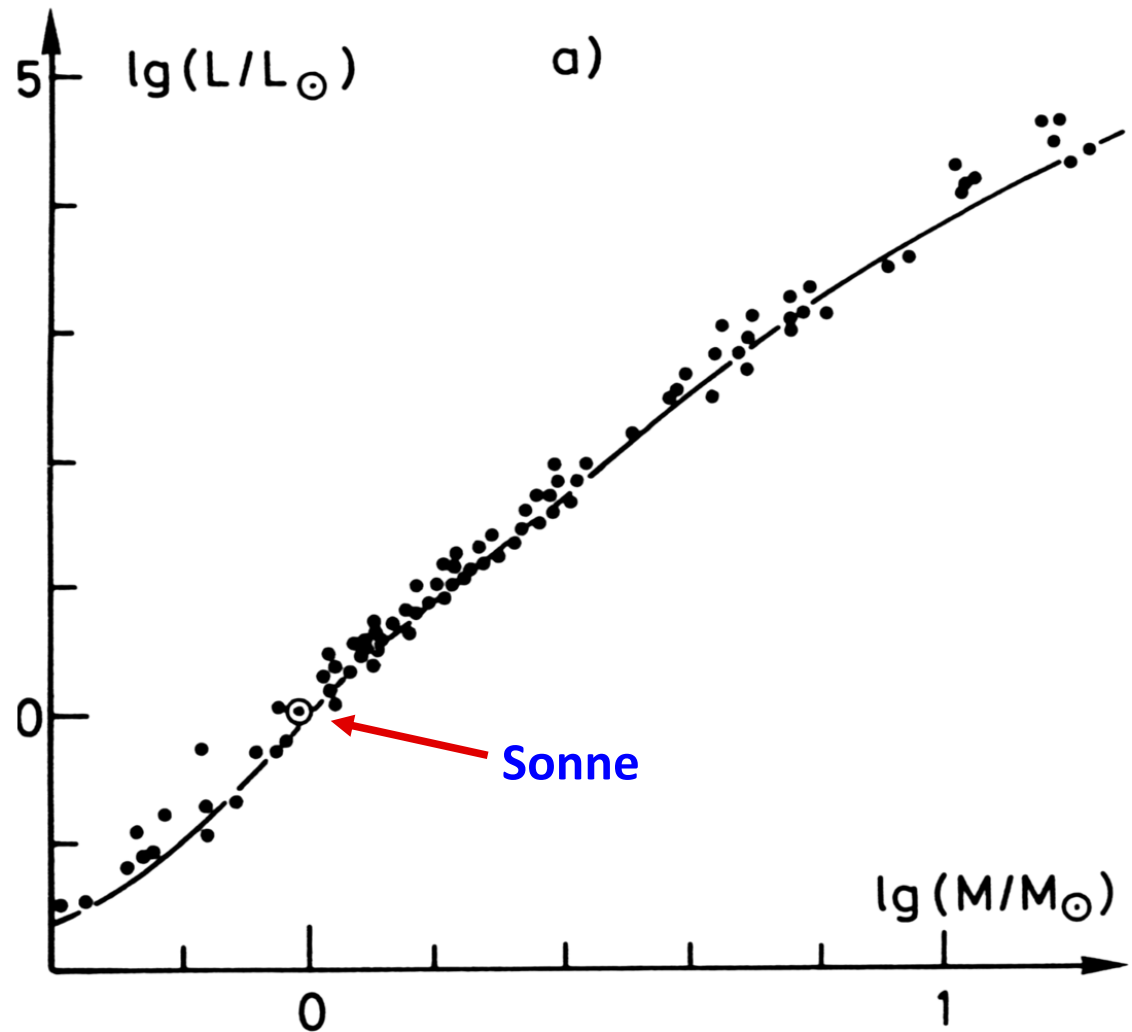
“Weiße Zwerge” weichen
ab, liegen nicht auf
der Hauptreihe



Masse-Leuchtkraft-Beziehung

In erster Näherung:

$$L \propto M^3$$



Herleitung (qualitativ)

- Mit **Stefan-Boltzmann** Gleichung
- und **idealer Gasgleichung** $nkT = P$
- Sowie Berücksichtigung der **hydrostatischen Schichtung**, hervorgerufen aus dem Gleichgewicht zwischen nach aussen gerichtetem Gasdruck und nach innen gerichteter Gravitationskraft, dann können wir ableiten

$$L \propto M^3$$

Masse-Leuchtkraft Beziehung

- Sterne mit **grossen absoluten Helligkeiten** besitzen **grosse Massen**!
- Diese massereichen Sterne befinden sich ebenso wie die schwächeren Sterne die längste Zeit ihrer Entwicklung auf der Hauptreihe.
- Dies deutet auf vergleichbare physikalische Vorgänge in ihrem Inneren hin, jedoch ist ihre Energieproduktion weitaus grösser.

Masse-Leuchtkraft-Beziehung

In erster Näherung:

$$L \propto M^3$$

Bessere Approximation:

$$L \propto M^{2.5} \left[M < 1 / 2 M_o \right]$$

$$L \propto M^{3.8} \left[M > 1 / 2 M_o \right]$$

- > Diese Beziehungen sind durch die Physik des **Sternaufbaus** und der **Sternentwicklung** bestimmt
- > Fundamentale Beziehung zum Verständnis der leuchtenden Materie
- > Folgerung: **Massereiche Sterne “leben” kürzer:**
 - $L \sim M^3$ (Energieverbrauch)
 - Energievorrat $\sim M$
 - > **Lebenszeit:** $t \sim \text{Energievorrat} / \text{Energieverbrauch} \sim M/L \sim 1/M^2$

Masse-Leuchtkraft-Beziehung

Massereiche Sterne “leben” kürzer:

Lebenszeit: $t \sim M/L \sim 1/M^2$ (oder $\sim M^{-3}$ für schwere Sterne)

Entwicklungszeit von Hauptreihensternen

(Zeit t_E nach der 10% Wasserstoff verbraucht ist)

Spektraltyp	Teff (°Kelvin)	Masse (Sonne=1)	Leuchtkraft (Sonne=1)	t_E (Jahre)
O5V	44500	60	405000	550000
B0V	30000	18	13000	2.4 Mio
B5V	15400	6	830	52 Mio
A0V	9500	3	54	390 Mio
F0V	7200	1,5	6,5	1.8 Mrd
G0V	6050	1,1	1,5	5.1 Mrd
K0V	5250	0,8	0,43	14 Mrd
M0V	3850	0,5	0,077	48 Mrd
M5V	3250	0,2	0,011	114 Mrd

Zusammenfassung I: Was wir durch Beobachtungen prinzipiell bestimmen können ...

- Parallaxe
- Scheinbare Helligkeit
- Bolometrische Helligkeit
- Absolute Helligkeit
- Klassifikation der Sternspektren
- Temperatur(en): effektive T , Ionisation, etc.
- Sternradien
- Massen

...aber nicht alles überall

- **Für die Sonne**
 - Direkte Bestimmung aller physikalischer Größen durch Beobachtungen
 - Spektroskope (Ionisation, chemische Häufigkeiten), Bolometer, Teilchenstrahlung, Sonnenflecken, Magnetfeld, Temperaturschichtung, Entfernung...
- **Für nahe Sterne**
 - Direkte Bestimmung der meisten physikalischen Größen
 - Spektroskopie (Ionisation, chemische Häufigkeiten), scheinbare Helligkeit, Entfernung
- **Für weit entfernte Sterne**
 - Bestimmung von
 - Farbe, scheinbarer Helligkeit
- **Grundprinzip: Eichung lokal, dann Extrapolation der Eigenschaften zu entfernten Sternen!**

Zusammenfassung II

- Die spektrale Analyse von stellaren Spektren erlaubt die **Klassifikation der Sterne in verschiedene Gruppen**.
- Zunächst werden die **charakteristischen Absorptionslinien** identifiziert und damit der **spektrale Typ des Sterns** festgelegt. Hierbei können die arabischen Ziffern von 0 bis 9 zur weiteren Untergliederung genutzt werden.
- Die **Leuchtkraftklasse** gibt an, wie groß die **Masse** des Sterns ist. Wir haben gesehen, dass beide durch die **Masse-Leuchtkraft Beziehung** zusammenhängen.
- Die untere Massengrenze wird durch die Zwergsterne markiert, die obere durch die Überriesen.
- Die Sterne auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell Diagramms (HRD) sind alle in etwa der **gleichen “Lebensphase”**, sie besitzen jedoch sehr unterschiedliche Massen und erzeugen daher stark unterschiedliche Energiemengen (unterschiedliche „Lebensdauern“!).
- Das **FHD** besitzt im Prinzip die gleiche Aussagekraft wie das HRD, kann jedoch auch **für weit entfernte Sternhaufen erstellt werden**.