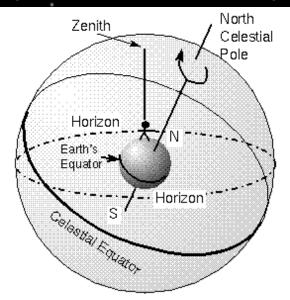
## Sternparameter - Sternentwicklung

- Der Sternhimmel
- Die Sternbilder
- Sternparameter
- Sternspektren
- Das Hertzsprung-Russel-Diagramm
- · Lebensdauer
- Rote Riesen-weiße Zwerge
- Altersbestimmung

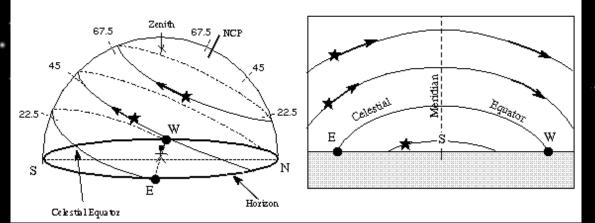


#### Orientierung am Sternenhimmel

- Fixsterne sind fest im Äquatorial-system
  - die Erdachse ist über mittlere Zeiträume fest
- Das Azimut-Elevations-System bewegt sich über den Himmel
- => Sterne gehen auf und unter

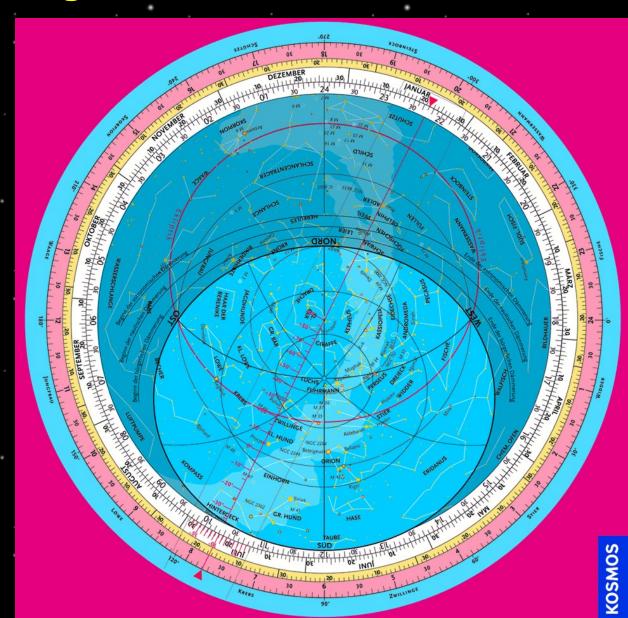


Höhe des Himmelnordpols = geogr. Breite des Beobachters Himmelsäquator schneidet den Äquator immer W & O Winkel zwischen HÄ und Horizont = 90 – geogr. Breite Sterne bewegen sich parallel zum Himmelsäquator



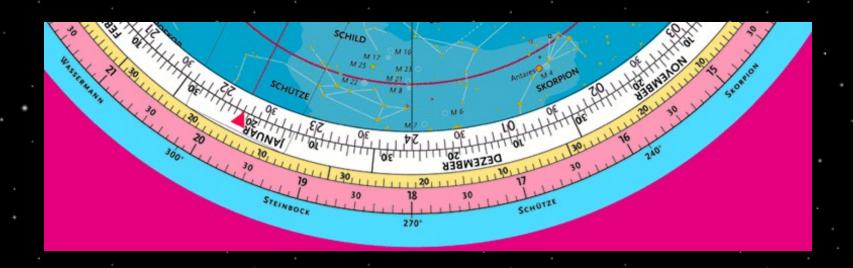
#### Orientierung am Sternenhimmel

- Die drehbare
   Sternkarte
  - · www.kosmos.de
- Zeigt aktuell sichtbaren Himmelsauschnitt



#### Orientierung am Sternenhimmel

- Jeder Himmelsausschnitt ist jeden Tag sichtbar
  - Die Sichtbarkeit wandert mit dem Jahr durch den Tag
  - Sterne die im Sommer am Nachthimmel stehen, stehen im Winnetr am Taghimmel
- Die Einstellung der drehbaren Sternkarte bezüglich Tageszeit und Jahreszeit ist vertauschbar.

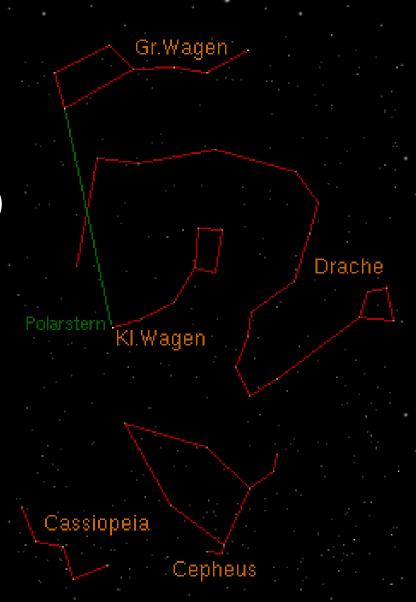


## Die moderne Alternative www.stellarium.org



- Aufteilung des Himmels in 88 Sternbilder
  - Namen aus griech. Mythologie (Nordhimmel) und Seefahrt (Südhimmel)
  - Abkürzungen mit drei Buchstaben
     Bsp: UMa = Ursa Major = Große Bärin
  - Ekliptik durchläuft 12 Sternbilder: Tierkreis-Sternbilder
  - Grenzen durch IAU festgelegt
- Bezeichnung der Sterne mit griech. Buchstaben mit fallender Helligkeit innerhalb eines Sternbildes
  - Hellste Sterne haben Eigennamen Bsp: a CMa (a Canis Majoris) = Sirius a Lyr (a Lyrae) = Wega

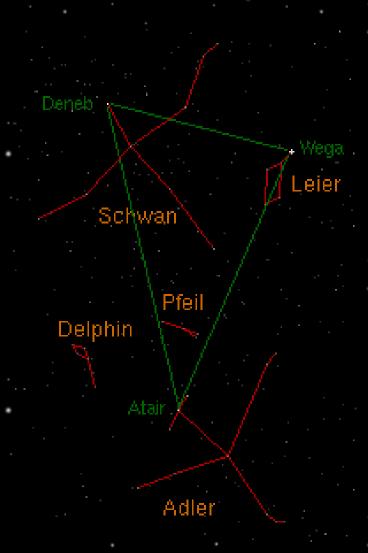
- Zirkumpolare Sternbilder:
  - Immer sichtbar
  - Kleine Bärin
     (Kleiner Wagen, Ursa Minor)
     enthält Polarstern
  - Große Bärin (Großer Wagen) und Kassiopeia meist gut sichtbar



- Winter-Sternbilder:
  - Enthält hellsten Stern: Sirius
  - Insgesamt 6 der 10 hellsten Sterne: Sirius, Capella, Rigel, Procyon, Beiteigeuze, Aldebaran
  - Leicht zu finden: Orion



- Sommer-Sternbilder:
  - Sommerdreieck gebildet aus Wega, Atair und Deneb
  - Milchstraße durchzieht Schwan und Adler

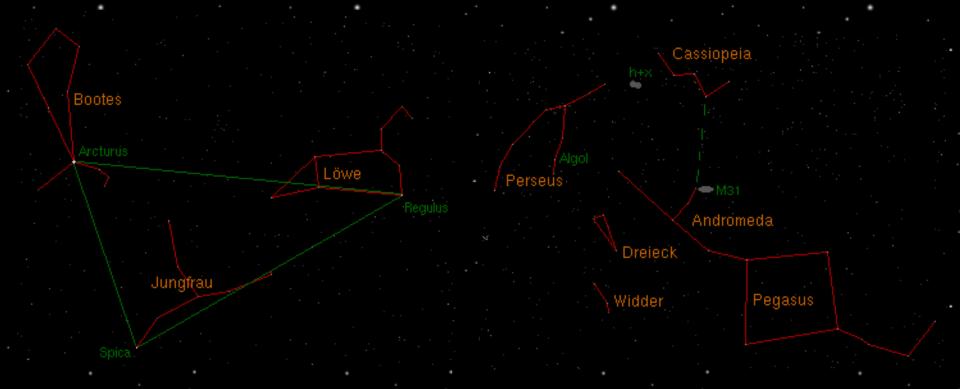


Frühlingssternbilder:

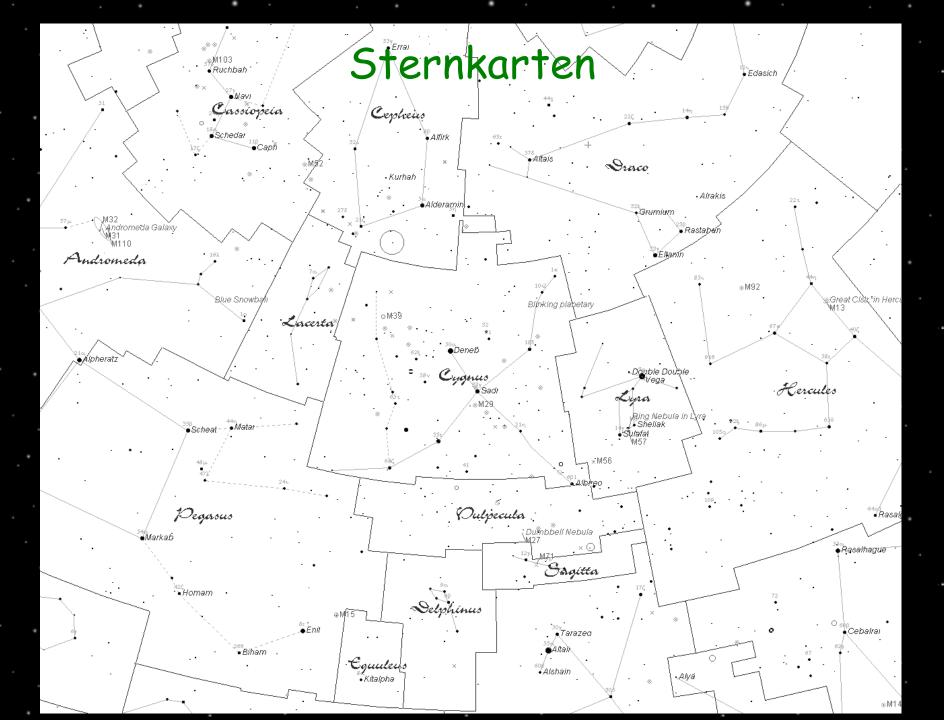
Herbststernbilder:

Arcturus, Spica, Regulus

keine der hellsten Sterne



Amateurastronomische Vereinigung Göttingen, www.avgoe.de



#### Sternparameter

- Die scheinbare Helligkeit
  - · Historische Skala mit
    - 1m für hellste Sterne und
    - 6<sup>m</sup> für schwächste Sterne
    - m = magnitudo (Größenklasse)
  - · Empfindlichkeit der Wahrnehmung logarithmisch
    - Ein Unterschied in der Intensität zwischen 1 und 2 scheint gleich groß wie der zwischen 2 und 4 oder zwischen 4 und 8.
- Logarithmische Helligkeitsskala:

$$m_1 - m_2 = -2.5 lg(I_1/I_2)$$

## Scheinbare Helligkeit

$$m_1 - m_2 = -2.5 lg(I_1/I_2)$$

# Helligkeitsunterschied 1m 2m.5 5m

10m

Intensitätsunterschied Faktor 2.512 Faktor 10 Faktor 100 Faktor 10000

#### Beispiele:

- Sonne: -26<sup>m</sup>.8
- Sirius: -1<sup>m</sup>.6
- Polarstern: 2<sup>m</sup>.12
- · Schwächste sichtbare Sterne: 6<sup>m</sup>

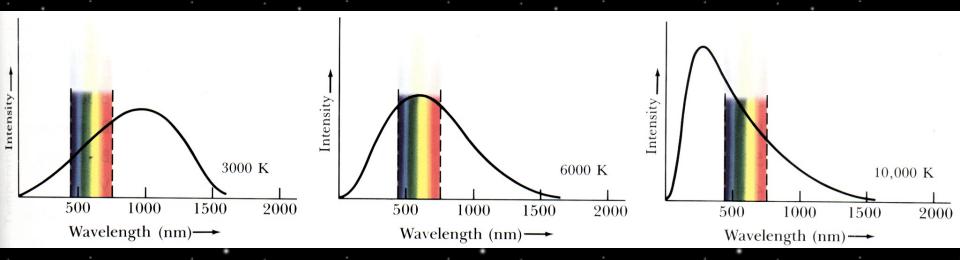
## Absolute Helligkeit

- Die scheinbare Helligkeit
  - Kombiniert tatsächliche Leuchtkraft
  - Entfernung: I ~ 1/r²
- Festlegung eines Nullpunktes bei r = 10pc = 32.6Lichtjahre
- Die absolute Helligkeit
  - · Helligkeit die Stern hätte, wenn er 10pc entfernt wäre

$$M = m - 5 \lg r + 5$$

- · Beschreibt tatsächliche Leuchtkraft des Sterns
- Bsp: Sonne  $M = 4^m.87$

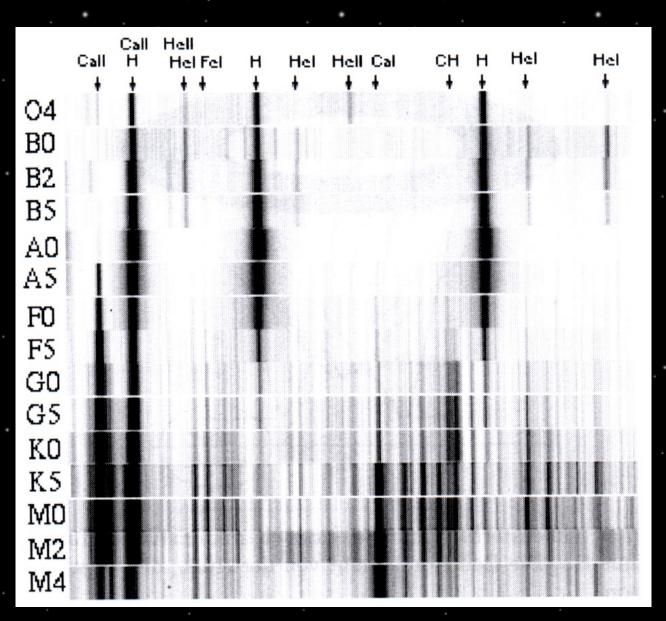
## Bolometrische Helligkeit



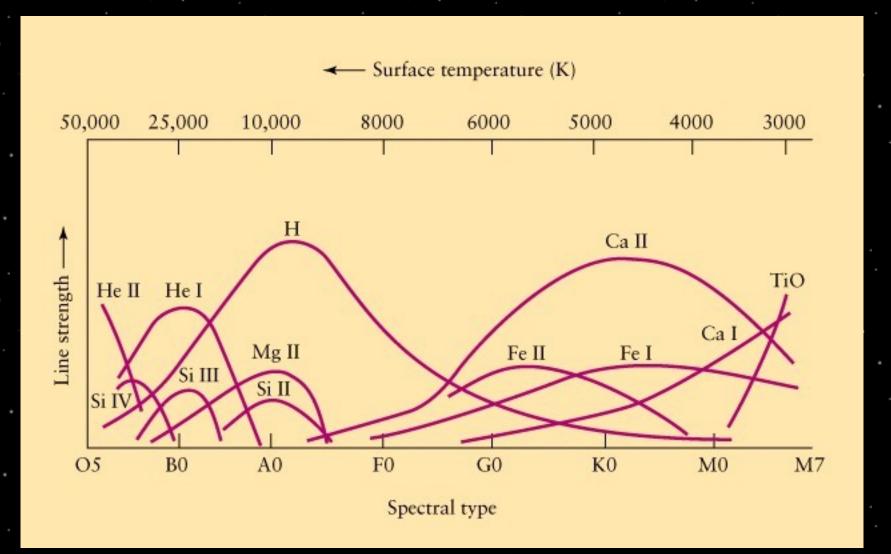
- Sterne strahlen auch außerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereiches
- Bolometrische Helligkeit: Gesamthelligkeit des Spektrums
- Bsp: Sonne M =  $4^{m}.87$ ,  $M_{bol} = 4^{m}.74$

Temperatur Spektral-Typischer Spektrum Farbe des Temperatur klasse Vertreter Sternlichtes B Spika 25 000 K bläulich **Sirius** A weiß Prokyon Kapella G gelblich K Arktur M Beteigeuze rötlich 2 800 ° K

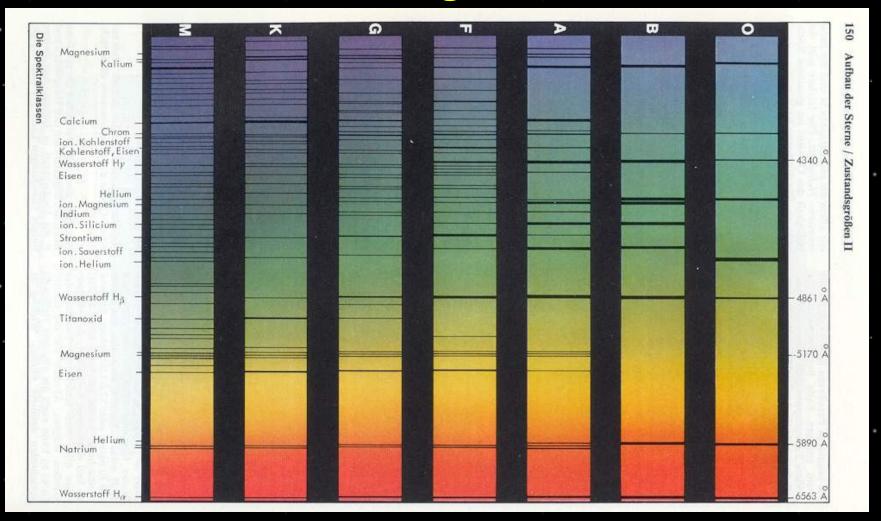
## Spektralklassen



#### Absorptionslinien bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen



## Oh be a fine girl, kiss me



Spektralklassen = Temperaturskala: 2500K - 30000K Unterklassen mit Nummerierung von 0 bis 9

## Die hellsten Sterne

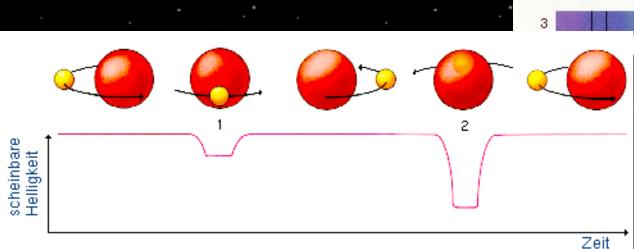
Eigenname	Bezeichnung	Helligkeit (V)	Entf. [Lj]	Spektraltyp
Sirius	$\alpha$ CMa	-1,46	8,6	A1Vm
Arcturus	$\alpha$ Boo	-0,04	312,6	K1 III
Wega	$\alpha$ Lyr	0,03	25,3	A0V
Capella	$\alpha$ Aur	0,08	42,2	G5IIIe
Rigel	$\beta$ Ori	0,12	772,5	B8a
Procyon	$\alpha$ CMi	0,38	11,4	F5IV-V
Beteigeuze	$\beta$ Ori	0,50	427,3	M1Ia
Altair	$\alpha$ Aql	0,77	16,8	A7V
Aldebaran	$\alpha$ Tau	0,85	65,1	K5III
Antares	$\alpha$ Sco	0,96	603,7	M1I
Spica	$\alpha$ Vir	0,98	262,1	B1III
Pollux	$\beta \ \mathrm{Gem}$	1,14	33,7	K0III
Fomalhaut	$\alpha$ PsA	1,16	25,1	A3V
Deneb	$\alpha$ Cyg	1,25	3227,7	A2Ia
Regulus	$\alpha$ Leo	1,35	77,5	B7V
Bellatrix	$\gamma$ Ori	1,64	242,9	B2III

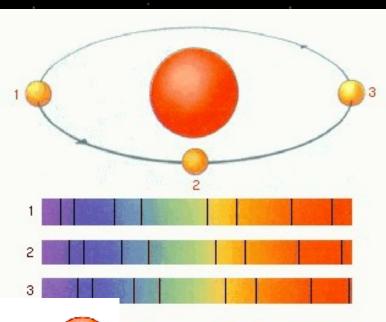
#### Radius

Sternscheiben können meist nicht aufgelöst werden

=> Radiusmessungen im Allgemeinen nicht möglich

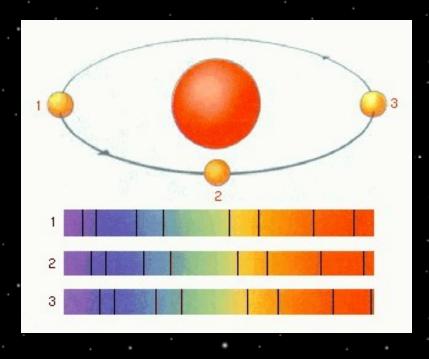
- Spezialfälle:
  - Bedeckungsveränderliche
  - Mondbedeckungen





#### Masse

- Auch nicht direkt beobachtbar
- Spezialfälle:
  - Doppelsternsysteme mit Dopplermessungen und Auflösung beider Komponenten
    - => Masse aus Kepler-Bahn



- Relativistische Rotverschiebung für sehr kleine und massereiche Sterne
- Allgemeine Beziehungen aus reicher Statistik

#### Unsere Sonne im Vergleich





Radius

#### Dichte

Leuchtkraft

T

 $\mathbf{V}_{\mathbf{rot}}$ 

**Energieerzeugung** 

1/10.000.000 1/1.000.000 1/100.000 1/10.000 1/1.000 1/100 1/10 1 10 100 1.000 10.000 100.000

## Systematisierung der Sternparameter

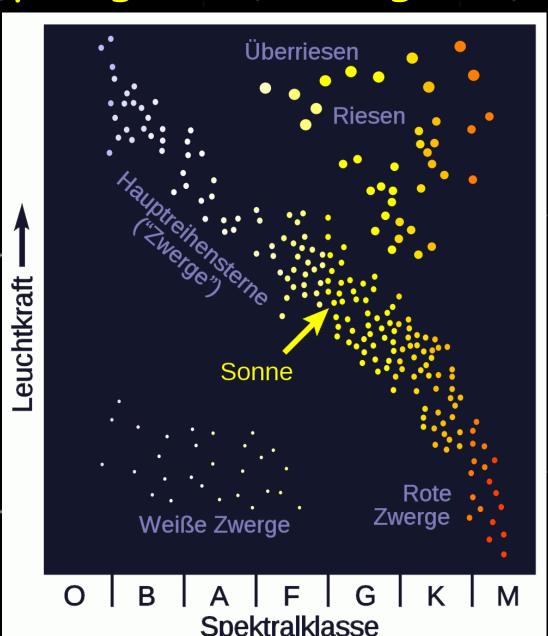


Ejnar Hertzsprung (1873 - 1967)

Henry Norris Russell (1877 - 1957)

## Das Hertzsprung-Russel-Diagramm

- Ordung nach Leuchtkraft und Spektralklasse
- · Sterne bilden klare Gruppen
  - Entsprechen verschiedenen Massen oder Entwicklungs-stufen



## Leuchtkraftklassen

#### $Morgan ext{-}Keenan ext{-}Leuchtkraftklassen$

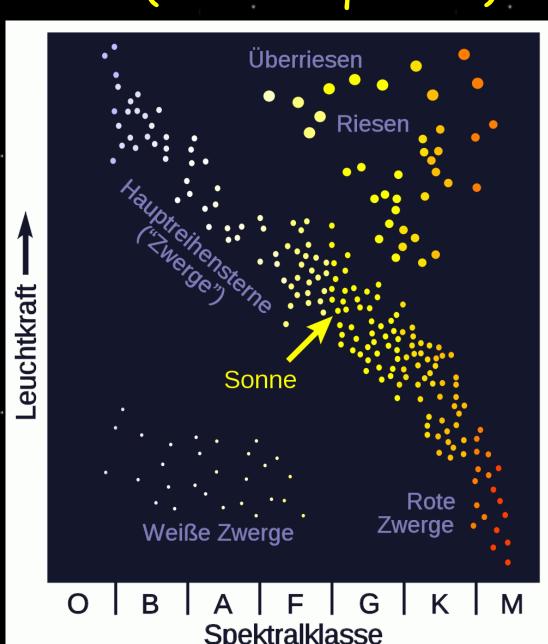
- I: Überriesen (Ia, Ib, Ic); supergiants,
- II: Helle Riesen (IIa, IIb, IIc), bright giants,
- III: Riesen (IIIa, IIIb, IIIc), giants,
- IV:Unterriesen, (IVa, IVb, IVc), subgiants,
- V: Zwergsterne (Va, Vb, Vc), Hauptreihensterne, dwarfs,
- VI: Unterzwerge, subdwarfs.

## Die Hauptreihe (Main sequence)

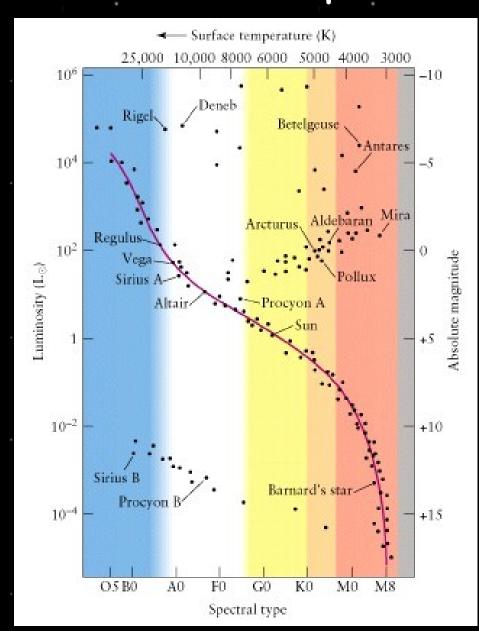
90% aller Sterne sitzen auf der Hauptreihe

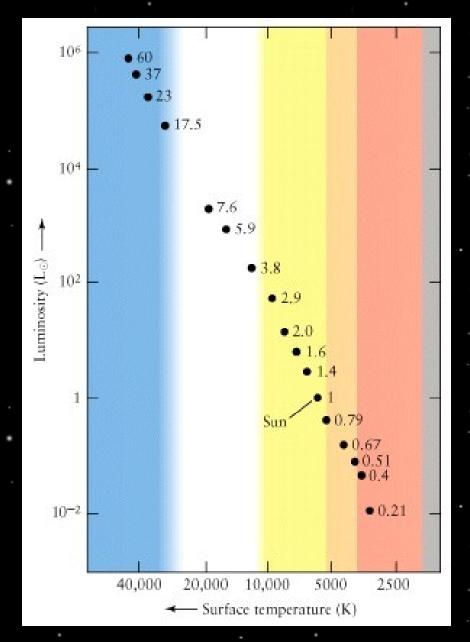
 Verteilung von hellen heißen Sternen bis zu kühlen Sternen geringer Leuchtkraft

> Phase des H-Brennens



## Sterntemperatur und Sternmasse





## Die Hauptreihe

Spektral-	Masse	Leuchtkraft	Temperatur	Radius
typ	$[{ m M}_{\odot}]$	$[{ m L}_{\odot}]$	[K]	Sonne = 1
O5	40	$7  imes 10^5$	40 000	18,
B0	16	$27  imes 10^4$	28000	7
A0	3,3	55	10 000	2.5
F0	1,7	5	7 500	1,4
G0	1,1	1,4	6 000	1,1
K0	0,8	0,35	5 000	0,8
M0	0,4	0,05	3 500	0,6

Feste Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

 $L \propto M^{3.5}$ 

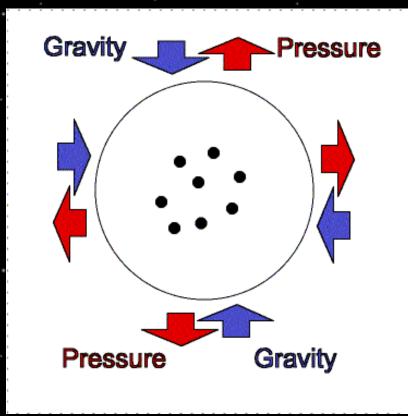
- Massereiche Sterne verschwenden ihren Wasserstoff

## Die Sternentwicklung

Masse	Spektral-	Kontraktion	Haupt-	Riese	Roter
$[{ m M}_{\odot}]$	typ	z. HR	reihe	a i beren	Riese
30	O5	0,02	4,9	0,55	0,3
15	В0	0,06	10	1,7	2
9	B2	0,2	22	0,2	5
5	B5	0,6	68	2	20
3	A0	3	240	9	80
1,5	F2	20	2000	280	1.736 97
1,0	G2	50	10000	680	1. A. Senier 1. A. S.
0,5	M0	200	30000		gardenn i
0,1	M7	500	$10^{7}$		

## Wiederholung: hydrostat. Gleichgewicht

- ·Gleichgewicht zwischen Gravitation und thermischem Druck:
  - Gravitation kontrahiert den Stern
  - Die Kompression erhöht die Temperatur und den thermischen Druck
  - Die Fusionsrate wächst, neue Reaktionen können zünden
  - Der thermische Druck wächst bis der Stern wieder expandiert.



#### Kritische Fusionstemperaturen

• D + H 
$$\rightarrow$$
 <sup>3</sup>He 800000 K

• Li + H 
$$\rightarrow$$
 <sup>4</sup>He 2.5 Mio K

• 3He 
$$\rightarrow$$
 <sup>12</sup>C 100 Mio K

• 
$$2C \rightarrow Mg/O$$
 600 Mio K

- Je nach Masse des Sterns kann die Gravitation unterschiedliche Kerntemperaturen erzeugen
- Die Masse bestimmt das Schicksal des Sterns!

#### Kritische Fusionstemperaturen

Die Masse bestimmt das Schicksal des Sterns!

•  $M > 0.02M_{\odot}$  : D- Brennen

•  $M > 0.06 M_{\odot}$  : Li- Brennen

•  $M > 0.085 M_{\odot}$  : H- Brennen

•  $M > 0.4M_{\odot}$  : He-Brennen

→brauner Zwerg

→ Hauptreihenstern

→ Hauptreihe , Roter Riese

- Besonderheit: Entartetes Gas
- Quantentmechanischer Effekt (Pauli-Prinzip):
   2 Fermionen (Elektronen, Neutronen) können nie im selben Zustand sein -> Fermi-Gasdruck, unabhängig von T
- Stabile Sternkonfiguration ohne Fusion,  $R \sim 1/M^{1/3}$

#### Der Stern verlässt die HR

Nach etwa 10 Mrd. Jahren geht der Wasserstoff im Kern zu Ende:

Der Strahlungsdruck lässt nach, der Stern verliert Energie und kontrahiert. Dadurch kann die Temperatur im Kern wieder steigen.

H wird nun aus der Hülle nachgeliefert:

Das H-Brennen im Kern steigt noch einmal an und der Strahlungsdruck kann die Hülle erneut ausdehnen: Die Oberfläche kühlt sich ab. Der Kern wird weiter mit He angereichert.

·Alter: 11 Milliarden Jahre

•Radius: ~ 2.6 R<sub>o</sub>

•T im Kern: 15,000,000 K

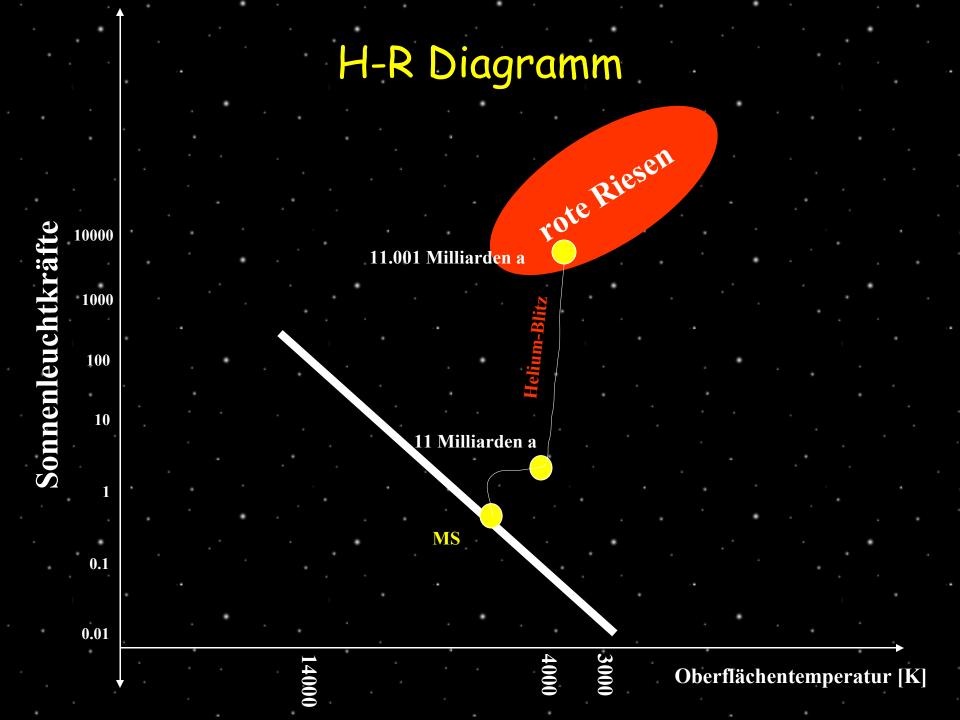
·T der Hülle: 4,500 K

#### Der Helium Blitz

- Für Sterne mit  $M=0.4-3M_{\odot}$ :
  - Normales Gas: pV = nkT
  - Entartetes Gas: (fast) unkomprimierbar (höhere T bewirkt keine Ausdehnung)
  - Sternkern beginnt He-Fusion (3α-Prozess) bei 10°K:

4He + 4 He 
$$\rightarrow$$
 8 Be +  $\gamma$   
8Be + 4He  $\rightarrow$  12C +  $\gamma$ 

- $\rightarrow$  T1  $\rightarrow$  Fusionsrate 1  $\rightarrow$  T1  $\rightarrow$  Helium Flash
- Bis T hoch genug (3.5 108K) um Entartung aufzuheben. (wenige Stunden)



#### Der rote Riese

Die zusätzlich freigesetzte Energie schiebt die Hülle nun gegen ihre Gravitation weiter nach außen. Das H-Brennen setzt sich nun auch in dichteren Schalen um den Kern nach außen fort und drängt die Hülle noch weiter hinaus, bis wieder ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht wird.

⇒ein roter Riese entsteht!

·Dauer: einige Millionen Jahre

•Radius:  $\sim 200 R_{\odot}$ 

•T im Kern: 200,000,000 K

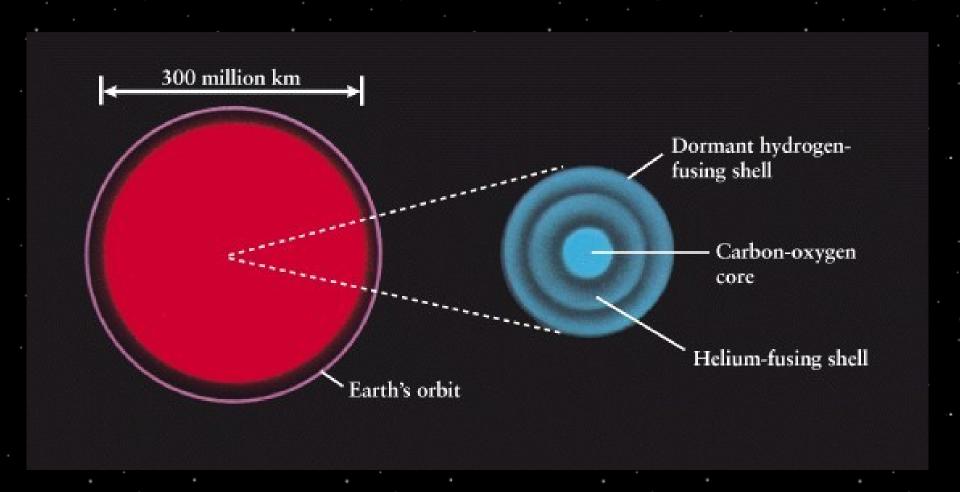
•T der Hülle: 3,500 K

·Energiequelle: 3a-Prozess im Kern, H-Brennen in der Hülle

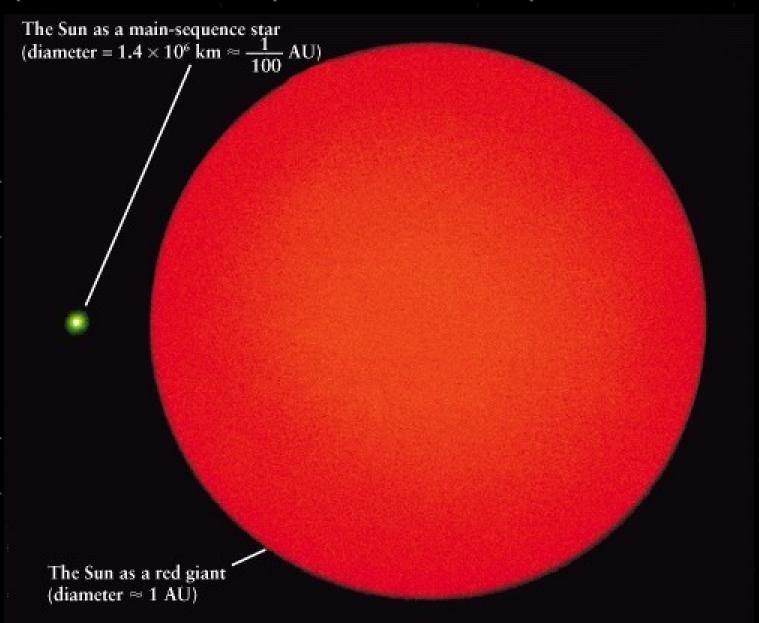
Endstadium der

Sonne

# Der rote Riese



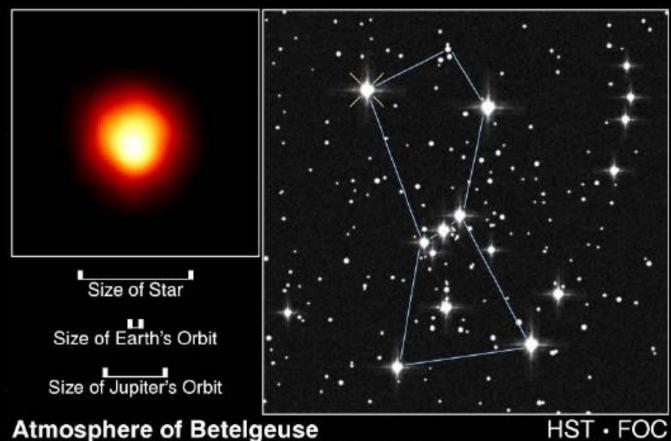
# Der rote Riese



#### Überriesen

#### Analoger Prozess für $M > 3M_{\odot}$ :

- Die Kerntemperatur erreicht die kritische Temperatur für das C-Brennen
- · C-Blitz
- Weitere Ausdehnung der Hülle

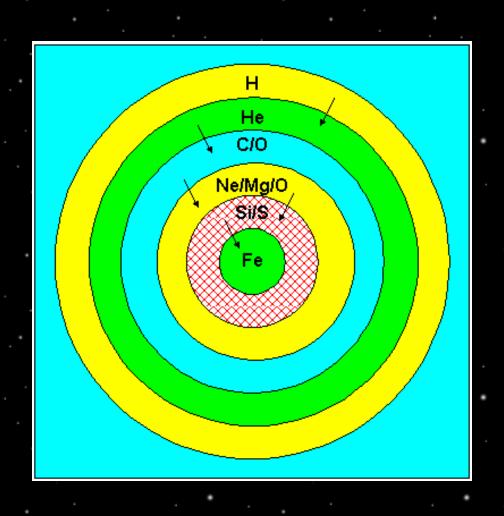


# Salpeter - Prozesse

Bei noch größeren Massen (M>8M<sub>☉</sub>) wird das C-Brennen hydrostatisch stabil. Der C-Blitz bleibt aus – das nukleare Brennen wandert stetig in die äußeren Schalen.

Damit nimmt der Druck in der Hülle zu, der wiederum zu höheren Temperaturen im Kern führt. Die Entartung des Elektronengases beim Kern-Brennen kann immer wieder aufgehoben werden und in weiteren Prozessen werden immer schwerere Elemente bis hin zu Eisen erzeugt.

### Zwiebelschalenbrennen



20 M<sub>☉</sub>:

HR Lebensdauer < 10 Ma

He Brennen ~ 1 Ma

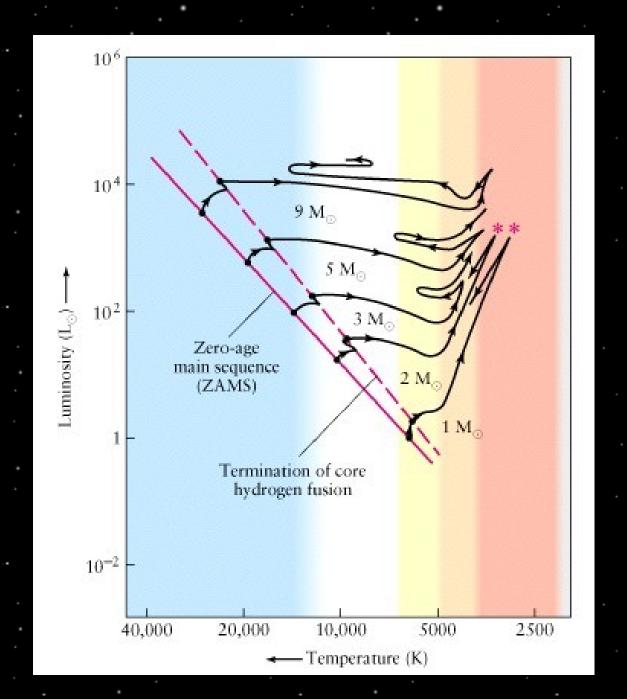
C Brennen ~ 300 a

Ne Brennen ~ 1 a

O Brennen ~ 10 a

Si Brennen ~ 2 d

Kollaps: 1 Sekunde!



# Nebenprodukt: Der planetare Nebel

Bei großen Sternen können nun die äußersten Schalen nicht mehr gehalten werden. Sie gehen verloren und bilden einen planetaren Nebel!



Masseverlust (qualitativ):

- 1) Sonnenwind  $(0.001 M_{\odot}/10^9 J)$
- 2) Schocks ok
- 3) Strahlungsdruck (UV) ok
- 4) Eruptionen in He Hülle ok

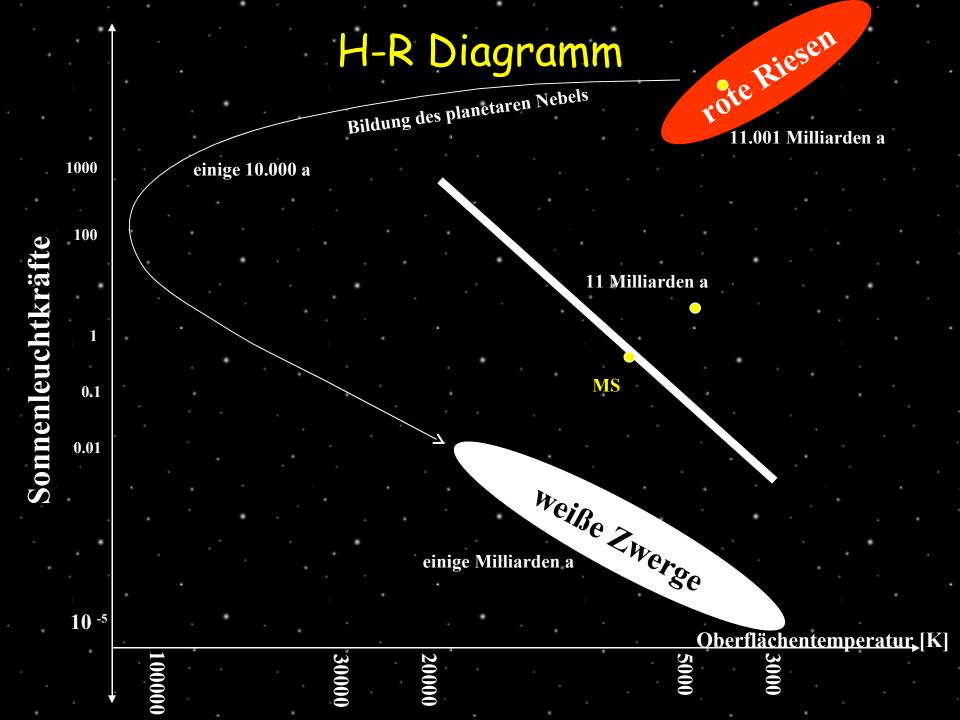
Masseverlust: ändert die Masse des Sterns und damit seine weitere Entwicklung (je nach Masseverlust)

## Letzte Stufe: Der Weiße Zwerg (1)

Nachdem die äußersten Schalen abgestoßen wurden, fällt der Kern nach Erlöschen der nuklearen Energiequelle unter dem Druck der restlichen Hülle in sich zusammen und bildet einen Kern aus entartetem Elektronengas (alle möglichen Energieniveaus sind besetzt):

den weißen Zwerg!

Lebensdauer: einige Milliarden Jahre T = 30,000 - 5,000 K  $d = d_{\oplus} \quad (\rho_{\oplus} = 5,5 \text{g/cm}^3)$   $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$  = 1 Tonne pro Teelöffel



## Letzte Stufe: Der Weiße Zwerg (2)

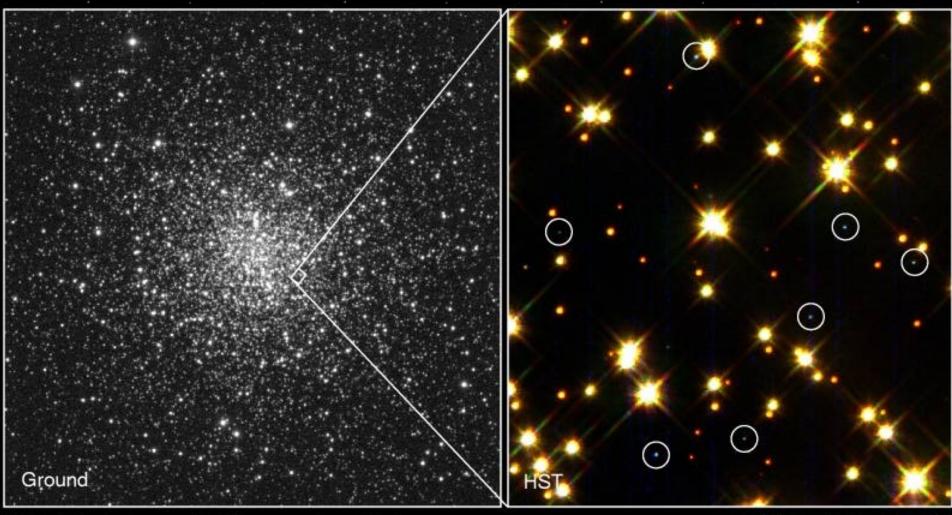
T = 
$$30,000 - 5,000 \text{ K}$$
,  $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$ 

- Im Inneren: C, O (Gitter?), entartete Elektronen
- Atmosphäre: dünn, heiß, ionisiert, reiner H, He, teilweise Spurenelemente
- Hinzufügen von Masse: R nimmt ab (Bei 1.4  $M_{sun}$ : R=0 Chandrasekhar limit)

Weißer Zwerg: verliert Wärme, kühlt zum schwarzen Zwerg

10° Weiße Zwerge in MW

## Weiße Zwerge in M4



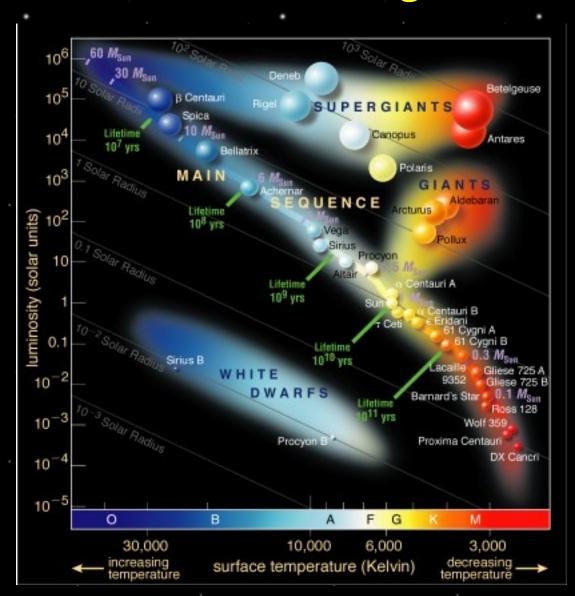
White Dwarf Stars in M4
PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

## NGC2440

Einer der heißesten weißen Zwerge mit 200,000 K

# Sterne im HR-Diagramm



### Altersbestimmung durch Sternhaufen

- Alle Sterne eines Haufens sind etwa gleichzeitig entstanden
  - Entsprechend ihrer Masse entwickeln sie sich unterschiedlich schnell
  - Wenn alle Massen vertreten sind, ist das Alter gegeben durch die Sterne, die auf der Hauptreihe schon fehlen.



# Der "Knick" in der Sternhaufen-Entwicklung

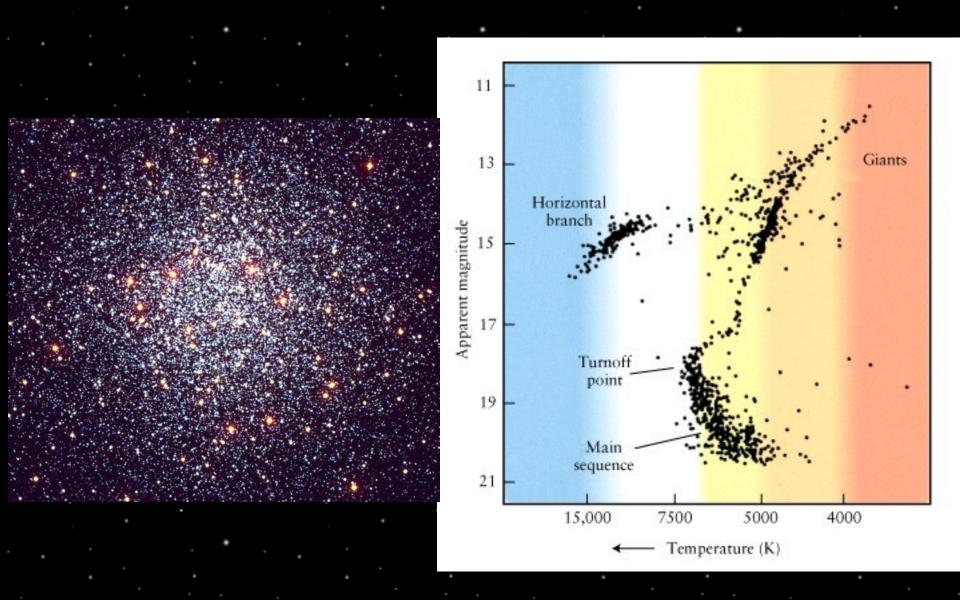
Im Alter von 1 Millionen Jahren sind alle massereichen Sterne auf der HR. Die massereichsten verlassen sie schon wieder, da ihre H-brennende Phase fast abgeschlossen ist. Masseärmere Sterne wie unsere Sonne sind noch gar nicht ganz auf der HR angekommen.

Nach 10 Millionen Jahren befinden sich Sterne mit Massen <  $1 M_{\odot}$  noch über der HR und beginnen gerade erst mit ihrem H-Brennen. Sterne mit 20  $M_{\odot}$  verlassen die HR. Nach 100 Millionen Jahren haben alle Sterne die Hauptreihe erreicht. Sterne mit  $M > 5 M_{\odot}$  verlassen sie schon wieder. Nach 1 Milliarde Jahren bewegen sich die Sterne mit 2-3  $M_{\odot}$  von der HR weg.

Der Knick in der HR markiert den Zeitpunkt, zu dem die Sterne ihren H aufgebraucht haben und sich in Richtung der roten Riesen bewegen.

Aus der Knickstelle kann somit das Alter des Sternhaufens abgeleitet werden.

#### M55



Alter: 15 Milliarden Jahre