

VI. Sterne: Zustandsgrößen

6-01

• Parameter der Sternatmosphären

⇒ T_{eff} , $\log g$

↑
Oberflächen-Schwerkbeschleunigung, $g = \frac{GM_{\star}}{R_{\star}^2}$

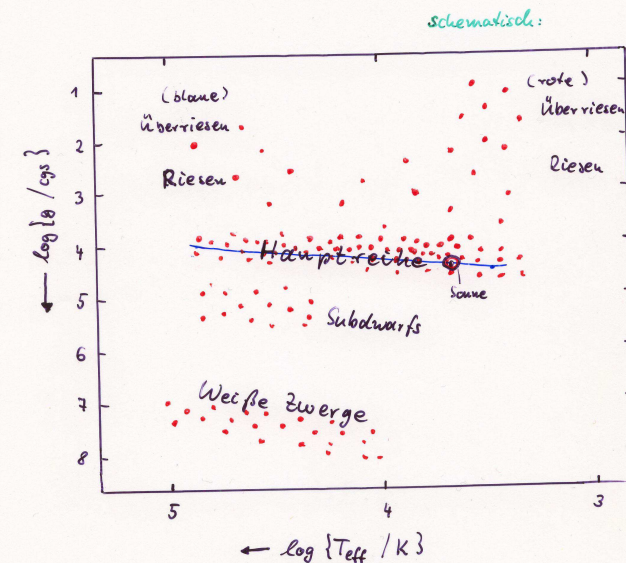
ferner: chemische Zusammensetzung
Rotation
Magnetfelder
Turbulenz
...

im Prinzip bestimmbar durch Spektralanalyse,
d.h. durch Vergleich mit Modellrechnungen
der Sternatmosphäre, vergl. Kap. IV!

Das $\log g - \log T_{\text{eff}}$ - Diagramm ("Kiel diagram")

VI. 2

6-03



6-02

vereinfachtes Verfahren:

[ergänze → nächste Seite.]

Spektral klassifikation

- phänomenologische Einteilung der Spektren in Spektralklassen anhand des Linien-Spektrums
- Eichung ("Kalibration") der Klassen
→ atmosphärische Parameter (bes. T_{eff})

Probleme bei Feinheiten und bei Sonder-Typen;
es gibt praktisch keine zwei Sterne mit genau identischen Spektren !!

6-04

- fast alle Sterne liegen in einem schmalen Streifen bei $\log g = 4.0 \dots 4.5$: "Hauptreihe"
- die Nomenklatur der $\log g$ -Gruppen beruht auf der Helligkeiten, obwohl dies a priori nicht miteinander zu tun hat (siehe folgende Seiten).

• Harvard - System

VI. 3

Klassen od. Typen:

O - B - A - F - G - K - M

übliche Sprechweise:

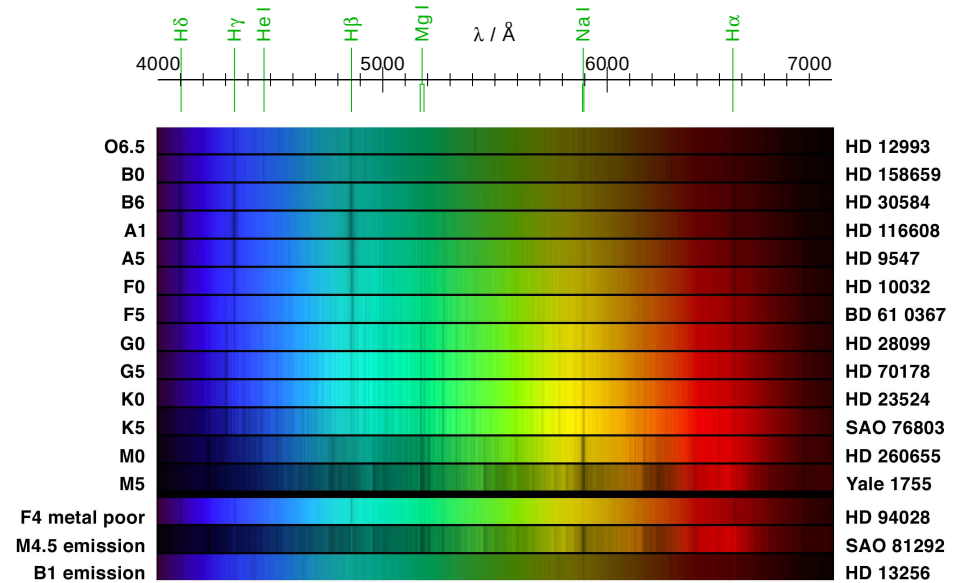
← "frühe Typen"

"späte Typen" →

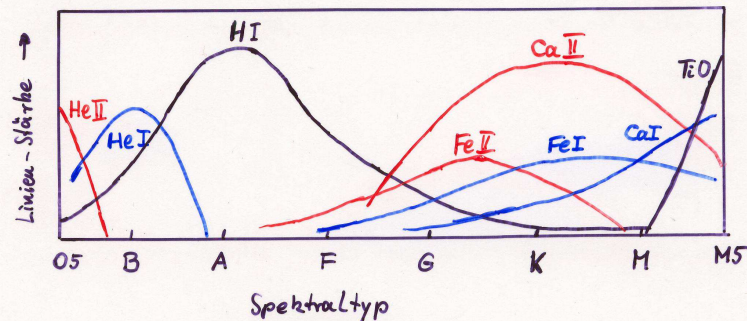
hat nichts mit einer zeitlichen Abfolge zu tun!

feinere Unterteilung durch Ziffern 0 ... 9,

z.B. O7, A2, G5



Beschreibung: [I heißt: neutral, II: einfach ionisiert...] 6-06



also:

max. der Balmer-lin.

I $\leftarrow$ He $\rightarrow$ I

I $\leftarrow$ Metalle $\rightarrow$ I

Farbe: blau — weiß — rot

T_{eff} / kK: 30 10 6 3

VI. 5 6-08

• Yerkes - oder MK - System

(MK = Morgan & Keenan)

= Harvard-Typ und eine zweite Dimension: sog.

Leuchtkraft-Klasse

Prinzipiell: reflektiert Einfluss der Dichte
am Ort der Linienentstehung:

- über die Ionisationsgrade (Saha-Formel?)
beachte: Anregung innerhalb eines Ions ist nicht von Dichte abhängig (SALZMANN!)
- über die Linien-Verbreiterung
(sog. Druck-Verbreiterung, z.B. Stark-Effekt)

Beispiel:

3 Sterne mit

$T_{\text{eff}} \approx 10 \text{ kK}$ (3 Typ R),

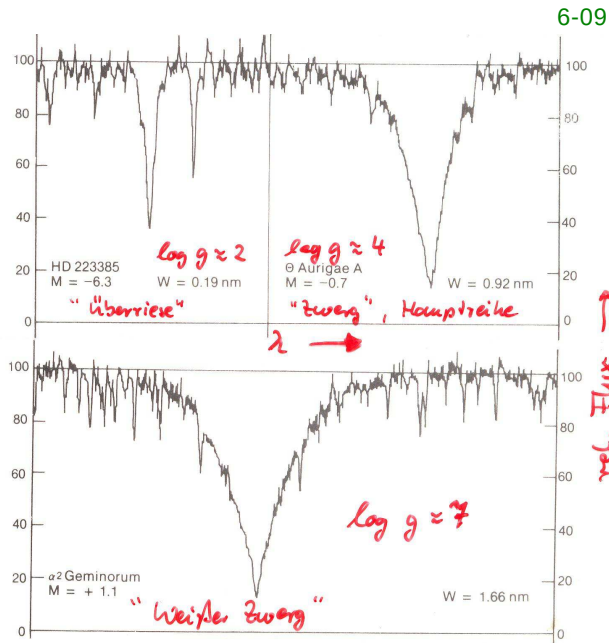
jedoch verschiedenen

$\log g$ [cgs-Einh.]

Profile von H_γ : $\Rightarrow$

aus:

Fundamental
Astronomy, p. 222



d.h.: Für Sterne gleicher Effektivtemperatur
und gleicher Masse ist $\log g$ ein Maß
für die Leuchtkraft L .

Daher der Name "Leuchtkraftklasse", obwohl
die spektroskopischen Merkmale eigentlich das
 $\log g$ widerspiegeln!

Angabe der Leuchtkraftklasse im MK-Spektraltyp:
nachgestellte römische Zahl, I ... VI, eventuell
unterteilt in α , ab , b .

Beispiele: G2 V (Sonne); A2 Ia; K0 III

6-11

Zusammenhang Dichte - $\log g$ - Leuchtkraft:

vergl. (I.7): Hydrostatische Gleichung,

Barometrische Höhenformel:

$\Rightarrow$ exponentieller Dichte-Anstieg $\propto e^{-h/H_0}$

mit Skalenhöhe $H_0 \propto 1/g$

also: hohes $\log g \hat{=}$ steiler Dichte-Anstieg
 $\hat{=}$ hohe Dichten in der "Sichttiefe"

Nach der Def. von g ist: $R^2 \propto M/g$

ferner: $L \propto R^2 T_{\text{eff}}^4$ (IX.14)

$\Rightarrow$ $L \propto T_{\text{eff}}^4 M/g$

VI.6

Leuchtkraftklassen (engl.: Luminosity class)

VI.7

I	Überriesen	super giants
II	helle Riesen	bright giants
III	Riesen	giants
IV	Unterriesen	sub giants
V	Zwerge = Hauptreihen-Sterne	dwarfs = main sequence stars
VI	Unterzwerge	sub dwarfs
(VII)	Weißer Zwerge	white dwarfs

6-12

Sonder typen z.B.:

6-13

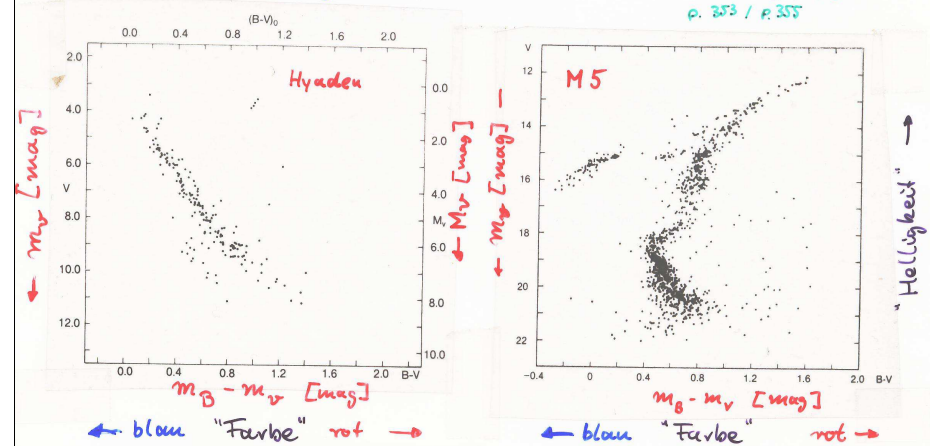
- Wolf-Rayet (WR) - Sterne
nur Emissionslinien: Massenverlust
- Zusätze: "p" = peculiar
z.B. Ap - Sterne: sehr starke Magnetfelder ...
"e" = Emissionslinien
z.B. Be - Sterne
"m" = metallic
z.B. Am - Sterne: ungewöhnliche starke Metall-Linien

a) Spezialfall: Sternhaufen

alle Mitglieder $\approx$ gleiche Entfernung, $\approx$ gleiche interstellare Abs.

$$\rightarrow M_v = m_v + \text{const.}$$

aus: Fundam. Astr.
p. 353 / p. 355



Farben - Helligkeits - Diagramm

VI. 8

m_v : scheinbare Helligkeit (photometrische Messgröße!)
(vergl. IV. 8) v = "visuell" = Johnson - Breitband - Filter
in Magnitudines [mag] $\hat{=}$ $-2.5 \log \{ \dots \text{flux} \dots \}$

M_v : absolute (visuelle) Helligkeit
• ohne interstellare Absorption • in 10 parsec [pc] Entfern.

$$m_v = M_v + D.M. + A_v$$

D.M.: "Distance Modulus" in [mag]
 $= 2.5 \log \left\{ \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right)^2 \right\}$

A_v : Interstellare Absorption entlang der Sichtstrahl
im v -Filter [in mag] (siehe Kap. X.)

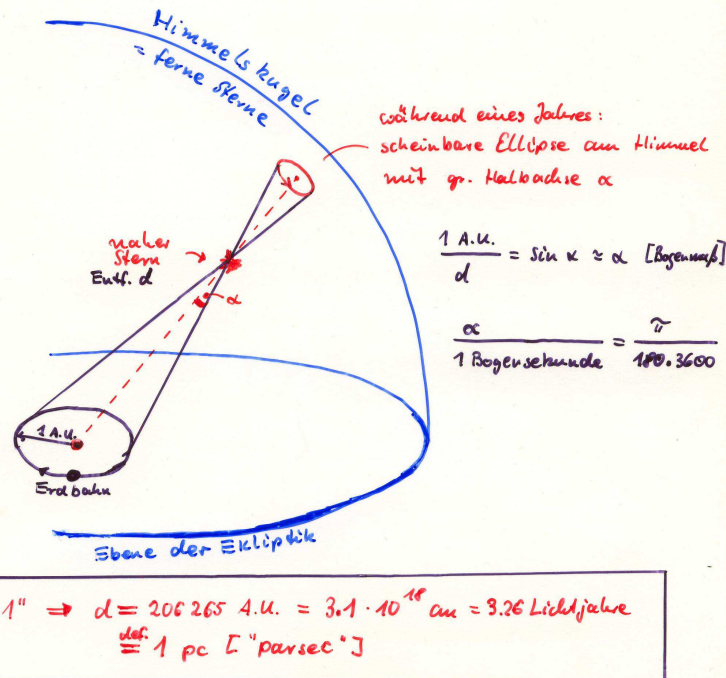
b) Feldsterne

Problem: individuelle Bestimmung der Entfernung
(und der interstellaren Absorption)

Einschub:

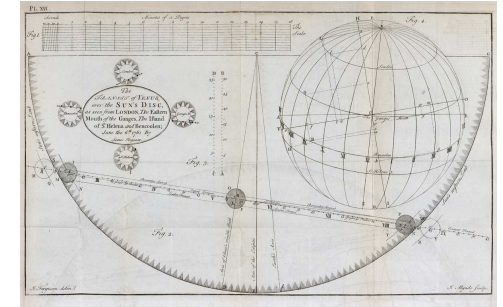
Trigonometrische Parallaxe

- die einzige unabhängige Methode zur
Entfernungsbestimmung von Einzel-Feldsternen!



Messungen von Parallaxen (Neuzeit)

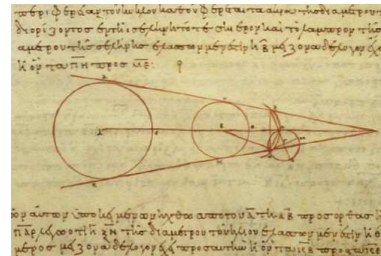
- Versuche von Tycho Brahe (1546 - 1601) - noch ohne Teleskop - blieben erfolglos → Ablehnung des heliozentrischen Weltbilds
- Messung der Parallaxe des Mars nahe Opposition zwischen zwei weit entfernten Orten der Erde (Südamerika - Paris) durch Cassini & Jean Richer (1672) → AU (ungenau)
- Messung der Parallaxe der Venus bei Transits vor der Sonne 1761 und 1769 auf Vorschlag von Halley mit vielen Beobachtern weltweit (u.a. Captain Cook) → AU auf 2% genau
- Wettlauf um die erste Messung der jährlichen Parallaxe von Fixsternen: Friedrich Bessel (1838 in Königsberg) fand $\pi = 0.35''$ bei dem Schnellläufer-Stern 61 Cyg (publiziert in den *Astronomischen Nachrichten* Vol. 16 p. 65)



Entfernungsbestimmungen in der Antike

Aristarch (310 - 230 v.Chr.)

- Entfernung des Mondes in Erddurchmessern aus maximaler Dauer von Mondfinsternissen
- Bestimmung des Erddurchmessers durch Eratosthenes (276 - 195 v.Chr.) → Kap. I
- Entfernung der Sonne in Einheiten der Mond-Entfernung durch Messung des Winkels zwischen Mond und Sonne zum Zeitpunkt des Halbmonds
Aristarch: $\alpha = 87^\circ \rightarrow AU = 20 d_{\text{Mond}}$; richtig: $\alpha = 89^\circ 51' \rightarrow AU = 390 d_{\text{Mond}}$
- A. folgert aus dem Fehlen merklicher Parallaxen der Fixsterne, dass diese viel weiter entfernt sein müssen: Seine Thesen sind, dass die Fixsterne und die Sonne unbeweglich sind, dass die Erde sich um die Sonne auf der Umfangslinie eines Kreises bewegt, wobei sich die Sonne in der Mitte dieser Umlaufbahn befindet, und dass die Sphäre der Fixsterne, deren Mitte diese Sonne ist und innerhalb derer sich die Erde bewegt, eine so große Ausdehnung besitzt, dass der Abstand von der Erde zu dieser Sphäre dem Abstand dieser Sphäre zu ihrem Mittelpunkt gleichkommt. (zitiert von Archimedes)



Entfernung aus gemessener Parallaxe α :

$$\frac{d}{\text{pc}} = \left[\frac{\alpha}{\text{Bogensek.}} \right]^{-1}$$

Problem: Meßgenauigkeit!

Frühe Teleskope: "seeing" $\approx 0.5''$ (Einzelmessung)

durch statistische Mittelung bestenfalls $0.02''$

→ nur bis $d \leq 50 \text{ pc}$ (= einige hundert Sterne)!

Besser vom Weltraum:

Astrometrie - Satellit HIPPARCOS:

Genauigkeit einige "mas" = 10^{-3} Bogensekunden

GAIA: $\pm 0.02 \text{ mas}$ (50kpc) - Start Dez. 2013, erste Ergebnisse 2016

... weiter: Helligkeit individueller Feldsterne

bei bekannter Entfernung $\Rightarrow$ Distance Modul $D.M.$

$$M_v = m_v - D.M. - A_v$$

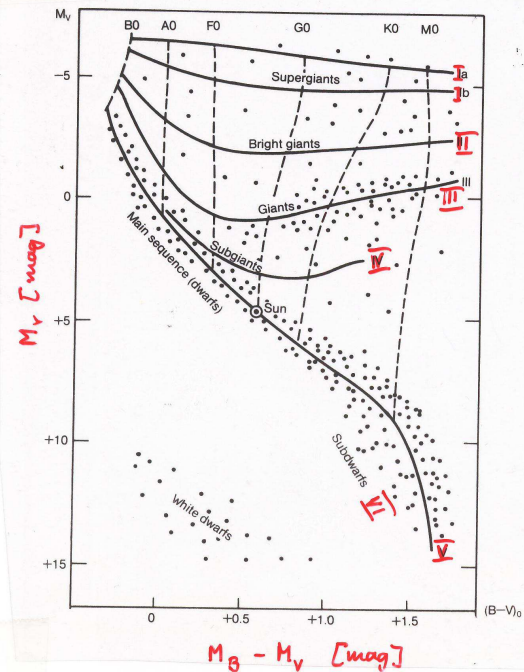
$\Rightarrow$ Farben - Helligkeits - Diagramm

oder: Hertzsprung - Russell - Diagramm (HR-Diagr.)

statt Farbindex $\rightarrow$ Spektraltyp

Vorteile: - nicht durch interstellare Rötung verfälscht

- besser diskriminierend bei ganz frühen Typen: O ... B5

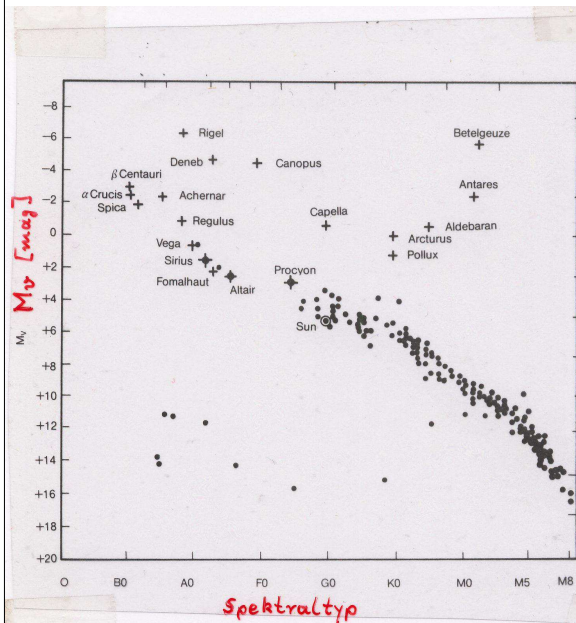


Farben - Helligkeits - Diagramm

Lage der Spektraltypen und der Leuchtkraft - klassen

aus:

Fundamental Astr. p. 225



HR - Diagramm

• = Sterne mit $d < 10 \text{ pc}$

(trigonometrische Entfernungen!)

+ = die 20 hellsten Sterne am Himmel

aus: Fundamental Astr. p. 226

VI. 11

• Parameter der Sterne

$\Rightarrow$ Leuchtkraft L ; Masse M ; Radius R

nicht aus $(T_{\text{eff}}, \log g)$ allein zu bestimmen!

Zusätzliche Informationen nötig!

a) photometrische Messung $\rightarrow f_v$ (Fluss beim Beobachter)

z.B. in Form von m_v

$\rightarrow$ um interstellare Absorptionen korrigieren.

Modell (Parameter: $T_{\text{eff}}, \log g$) $\rightarrow F_v$ (Fluss an der Sternoberfläche)

geometrische Verdünnung:

$$f_v = F_v \frac{R^2}{d^2} \quad (\text{vergl. IV.9})$$

$$\text{"Winkelhalbmesser"} \quad \frac{R}{d} = \sqrt{f_v / F_v} \quad \odot$$

b) die Entfernung d muss bekannt sein!

$$\Rightarrow \text{Radius } R = d \sqrt{f_r / f_r}$$

- aus T_{eff} und R folgt die

$$\text{Leuchtkraft: } L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (\text{siehe IV. 14})$$

☼ Winkelhalbmesser von einigen Dutzend Sternen sind auch direkt messbar:
Michelson-Interferometer; Speckle-Interferometrie; Intensitäts-Interferometer;
Bedeckung durch den Mond.

Masse M :

- nur bei bekannter Entfernung d :

M aus $\log g$: "spektroskopische Masse"

$$M = \frac{g R^2}{G} = \frac{g}{G} d^2 \frac{f_r}{f_r}$$

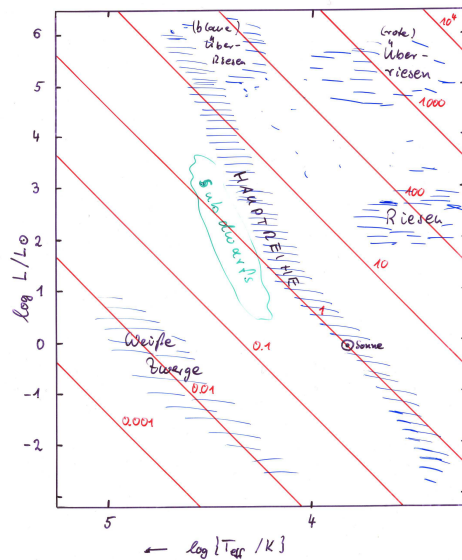
nicht sehr genau:

- $\log g$ - Bestimmung bestenfalls $\pm 25\%$
- $\propto d^2$
- bei Doppelsystemen: aus Gravitationswirkung
(siehe später)

Hertzsprung - Russell-Diagramm:

die "Theoretischen Kurven":

schematisch



- bei sehr hohem $\log g$ (Weiße Zwerge):
Gravitations-Rotverschiebung der Linien
(schwer zu messen wegen der Druck-Verbreiterung!)

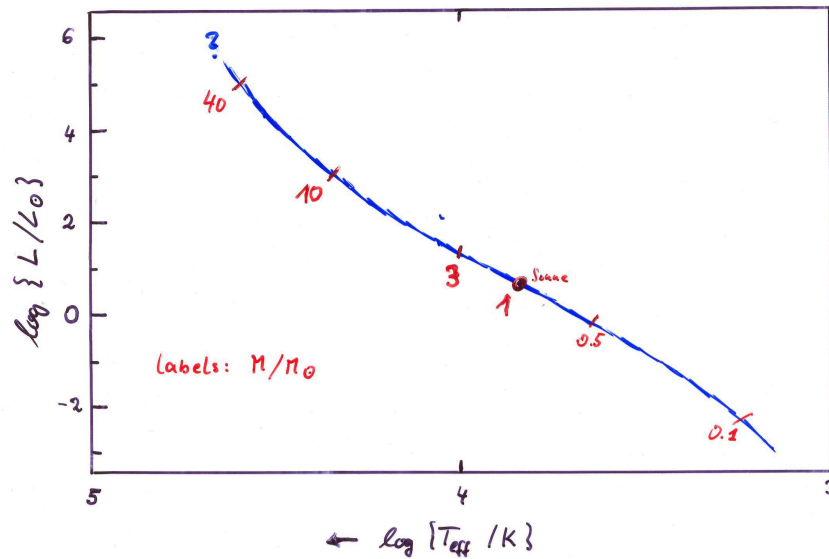
$$\Delta \lambda \propto \frac{GM}{R}$$

$$\rightarrow \text{Kombination mit } g = \frac{GM}{R^2} \Rightarrow R, M$$

→ Massen sind i.A. nur schlecht bekannt!

Ergebnis: Massen auf der Hauptreihe

Schematisch:



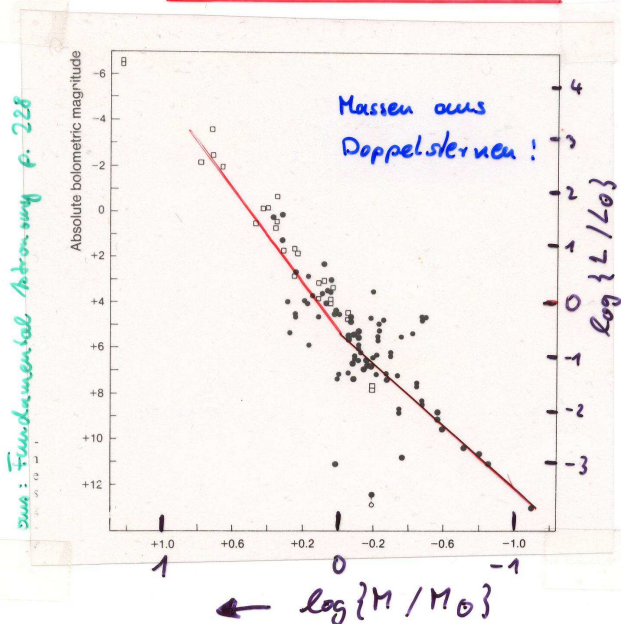
Zusammenfassung:

Spektralanalyse $\Rightarrow T_{\text{eff}}, \log g$

nur mit bekannter Entfernung $\Rightarrow L, R, M$

- nur ganz wenige nahe Sterne mit trigonometrischer Parallaxe
- bisweilen indirekte Entfernungsbestimmung über Zugehörigkeit zu galaktischen Häufen oder Assoziationen (zu deren Entfernung: siehe nächste Seite!)
- entsprechend: einheitliche Entfernung bei Objekten in anderen Galaxien (Magellans'sche Wolken, Andromeda - Nebel etc.)

$\Rightarrow$ Massen-Leuchtkraft-Relation (für Hauptreihen-Sterne!)



$M \geq 1 M_\odot$:

$L \propto M^4$

$M \leq 1 M_\odot$:

$L \propto M^2$

im Mittel:

$L \propto M^3$

• häufig angewendet: umgekehrte Schlussweise:

Analyse $\rightarrow T_{\text{eff}}, \log g$, chem. Zusammensetzung

$\rightarrow$ vermutete Entwicklungsstadium (z. B.: Hauptreihe!)

$\rightarrow$ theoretische Helligkeit

$\rightarrow$ Vergleich mit beobachteter Helligkeit

$\rightarrow$ "spektroskopische Entfernung"