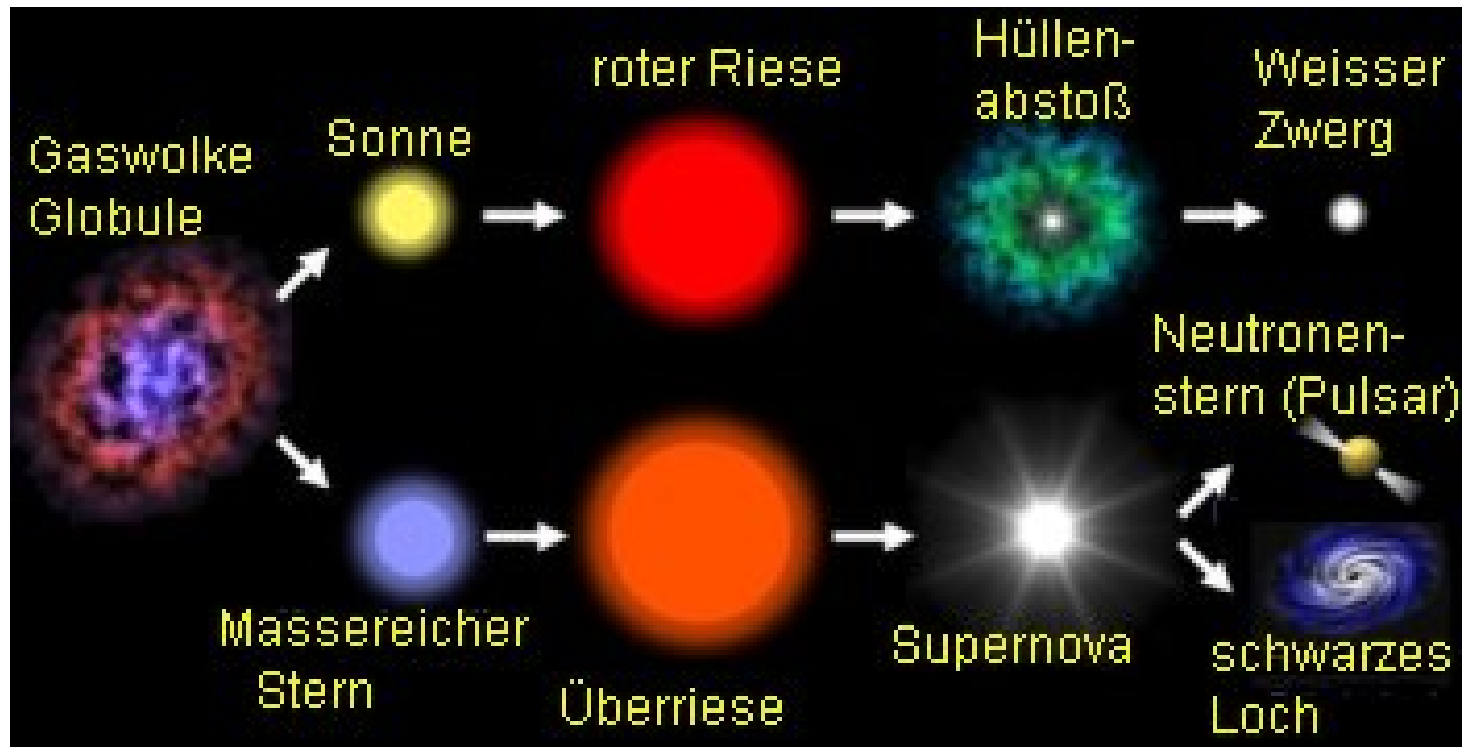
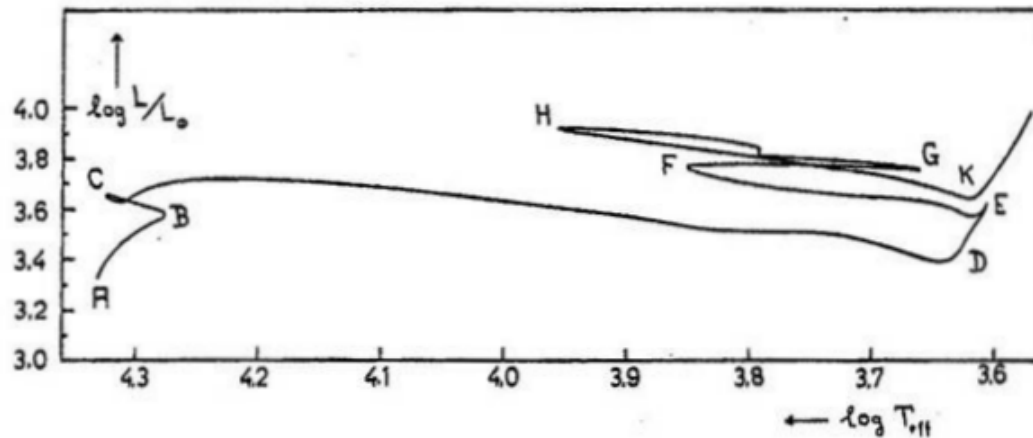


# LK III bis I



Hauptreihe  
LK V und IV



(A-B) Verbrennen des konvektiven Kerns

(B-C) Absterben des konvektiven Kerns; Übergang zur Schalenquelle. He-Kern etwa 15%, nicht isotherm

(C-D) Kontraktion des Kerns

Bei (D) Beginn des He-Brennens; Stern nahe der Hayashi-Linie. Dicke äußere Konvektionszone

(D-E) Äußere Konvektionszone; H-brennende Schale, He-brennender Kern

(E-F) Langsames Leerbrennen des Kerns

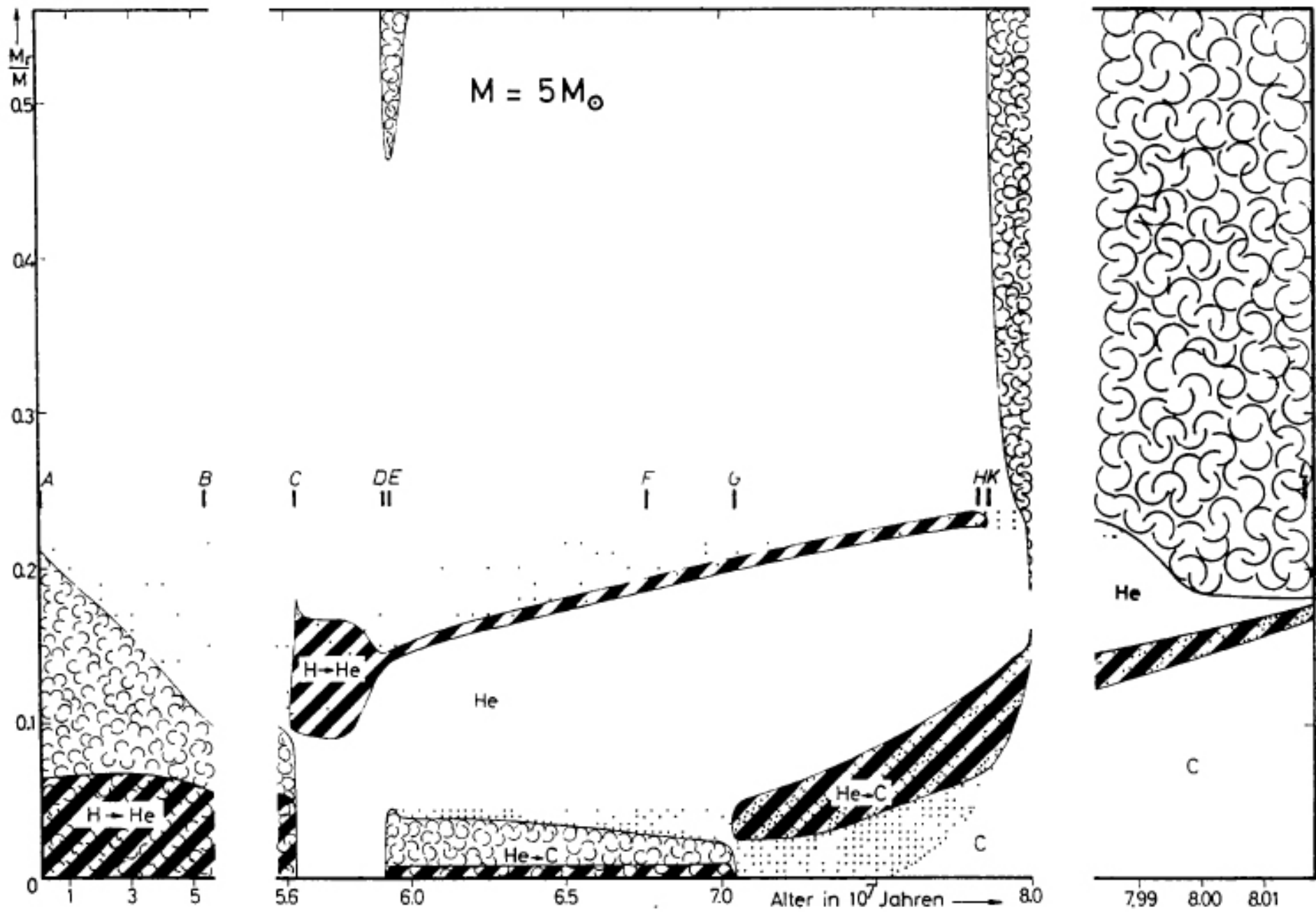
(F-G) Absterben des konvektiven Kerns; eine H- und eine He-brennende Schale

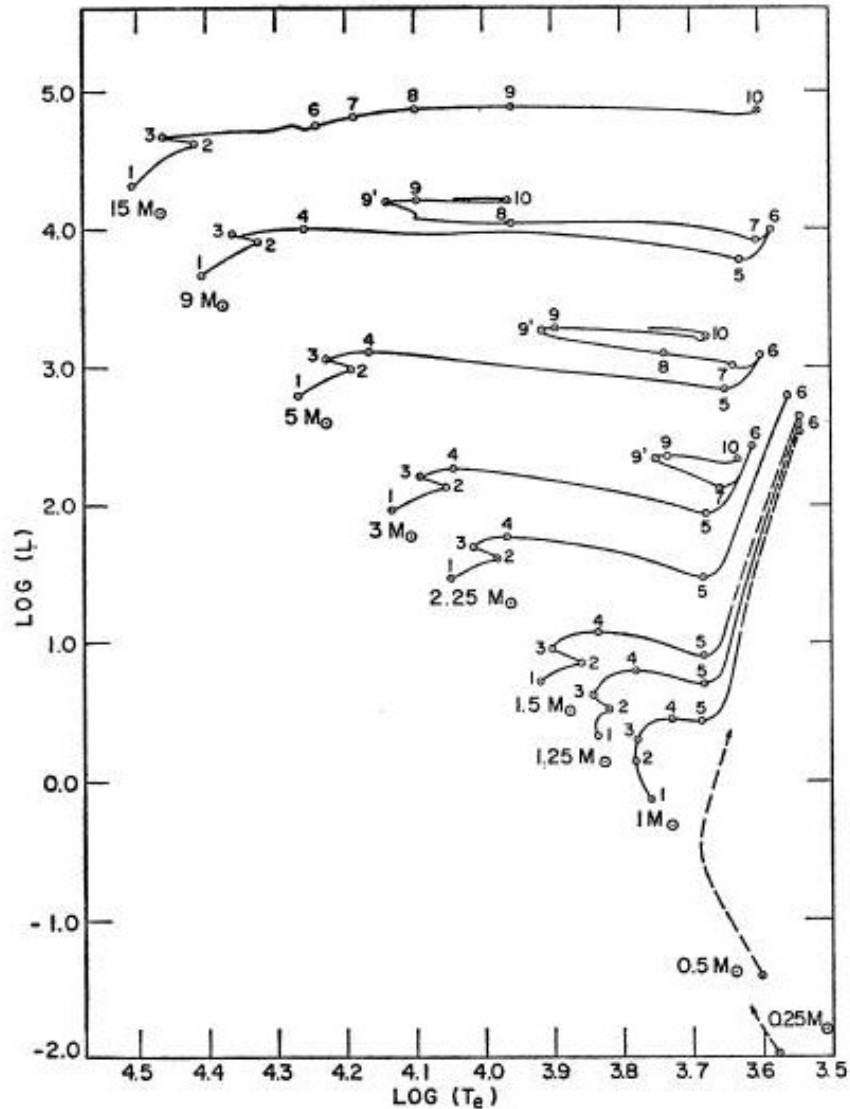
(G-H) Kontraktion des Kerns; Absterben der H-brennenden Schale

(H-K) Kontraktion des Kerns; nur noch eine (He-brennende) Schale; Kohlenstoff-Kern

$$L \approx M^3$$

$$\tau \approx \frac{M}{L}$$





Masse	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
15	10	0.2	-- 0.08 --		
9	20	0.6	0.09	0.2	0.07
5	65	2	1	0.8	0.5
3	220	10	10	5	4
2.25	480	15	35	15	38
1.5	1550	80	350	105	> 200
1.25	2800	180	1045	150	> 400
1	7000	2000	1200	155	> 1000

Masse	6-7	7-8	8-9	9-10
15	0.7	0.6	0.2	0.04
9	0.5	0.1	3	0.2
5	6	1	9	0.9
3	25	-- 41 --		6

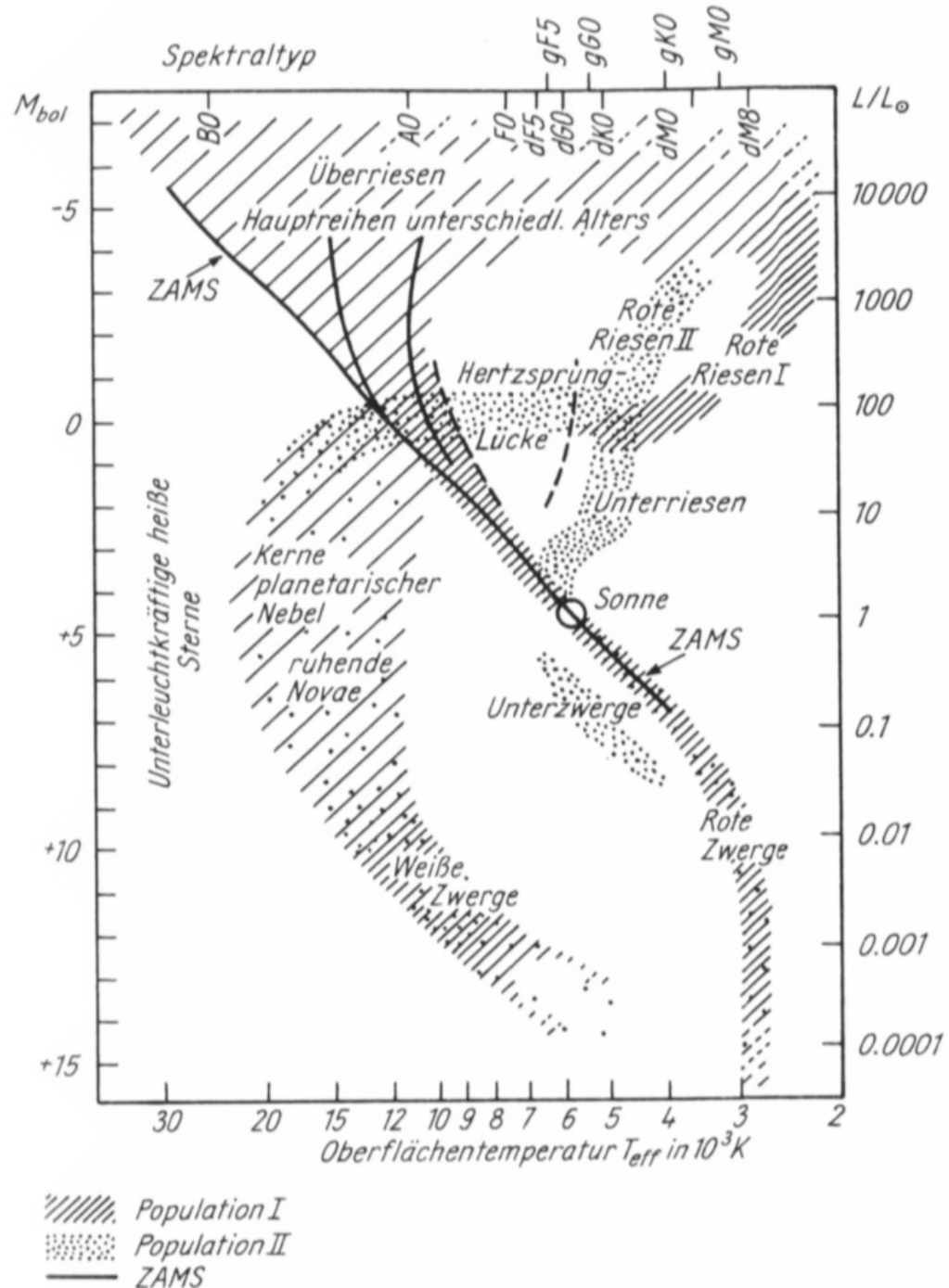
Zeitangaben in Myr

Iben, 1967, ARA&A, 5, 571

# Schematische Darstellung

## Zero Age Main Sequence

Nullhauptreihe, dort wo die Sterne nach ihrer Entstehung die Hauptreihe erreichen = stabiles Wasserstoffbrennen im Kern, „hydrostatisches Gleichgewicht“ in der Hülle



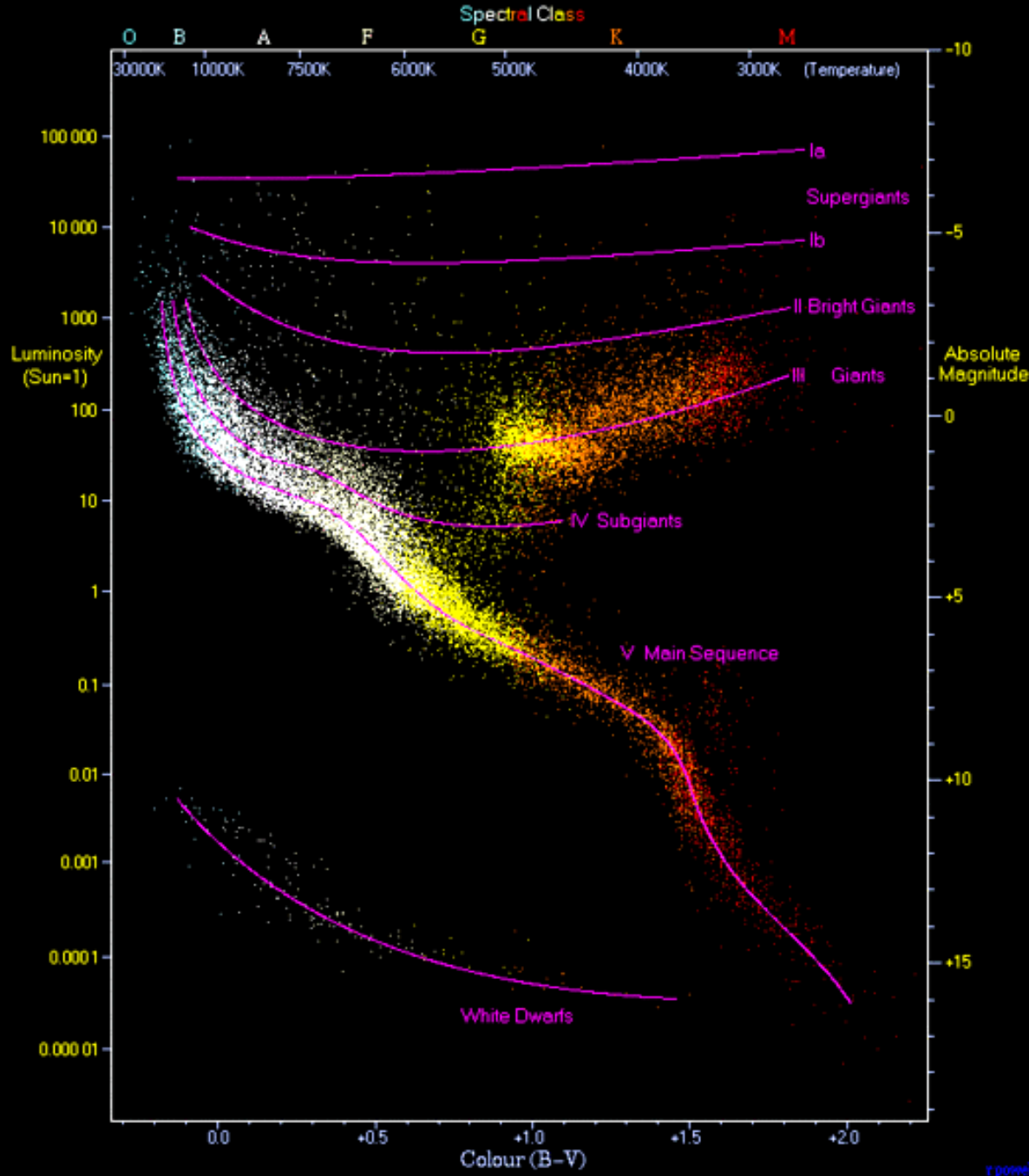


Tabelle 3.1 Leuchtkraftklassen

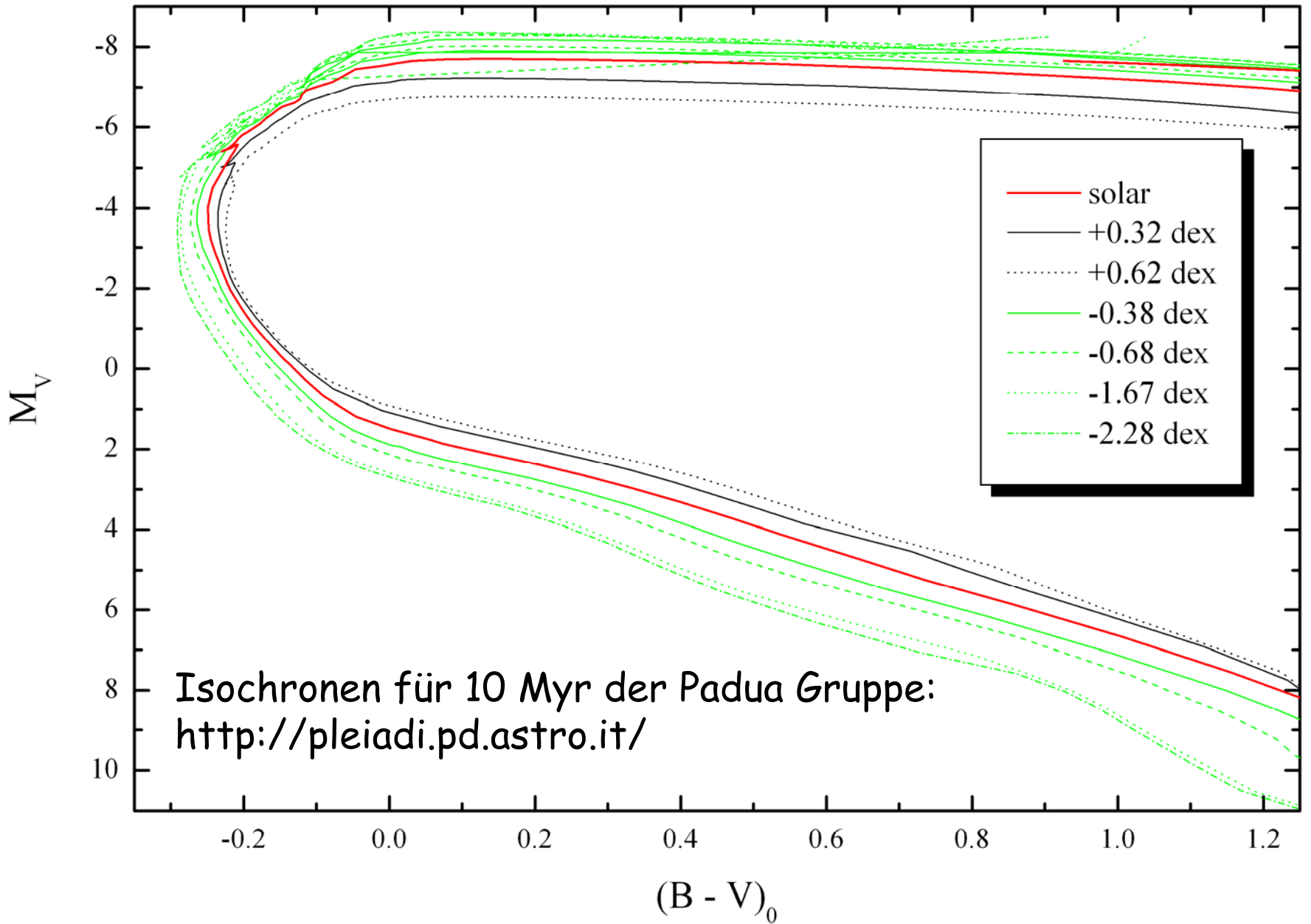
Leuchtkraftklasse	Bezeichnung der Sterne
I	Überriesen
II	helle Riesen
III	Riesen
IV	Unterriesen
V	Hauptreihen- oder Zwergsterne
VI	Unterkwerg
VII(D)	Weißer Zwerge

FHD aller Feldsterne aus dem Hipparcos Katalog, d.h. nur die Sonnenumgebung

Die **Metallizität** verändert unmittelbar die Lage der Hauptreihe

Der Grund ist die Opazität in der Sternatmosphäre. Vereinfacht gesagt, ist bei größerer Metallizität auch die Opazität in der Sternatmosphäre höher. Eine höhere Opazität heißt, daß die Sternatmosphäre „undurchsichtiger“ für Photonen wird, damit wird die Temperatur im Kern des Sternes erhöht. Eine höhere Zentraltemperatur führt zu einer höheren Energieproduktionsrate und einer höheren Leuchtkraft (bei konstanter Masse).

Somit wird die Hauptreihe bei größerer Metallizität (Elemente schwerer als Helium) zu höheren Leuchtkräften verschoben sein.





# Berechnung von Isochronen

Die Berechnung von Isochronen (= Linien gleichen Alters) erfolgt über die Verwendung von theoretischen Sternatmosphären.

Festzulegen: Metallizität  $[X, Y, Z]$

Nullhauptreihe  $[T_{\text{eff}}, L]_0 \Rightarrow$  chemische und gravitative Entwicklung  $\Rightarrow [T_{\text{eff}}, L](t) \Rightarrow$  entsprechende Sternatmosphäre = **PHYSIK**  $\Rightarrow$  absolute Flüsse  $\Rightarrow$  Faltung mit Filterkurven  $\Rightarrow$  Farben

# Welche Physik spielt eine Rolle?

- Zustandsgleichungen
- Opazitäten
- Konvektionsmodell
- Core Overshooting
- Heliumhäufigkeit
- Nicht berücksichtigt:
  - Rotation
  - Massenverlust
  - Magnetfelder

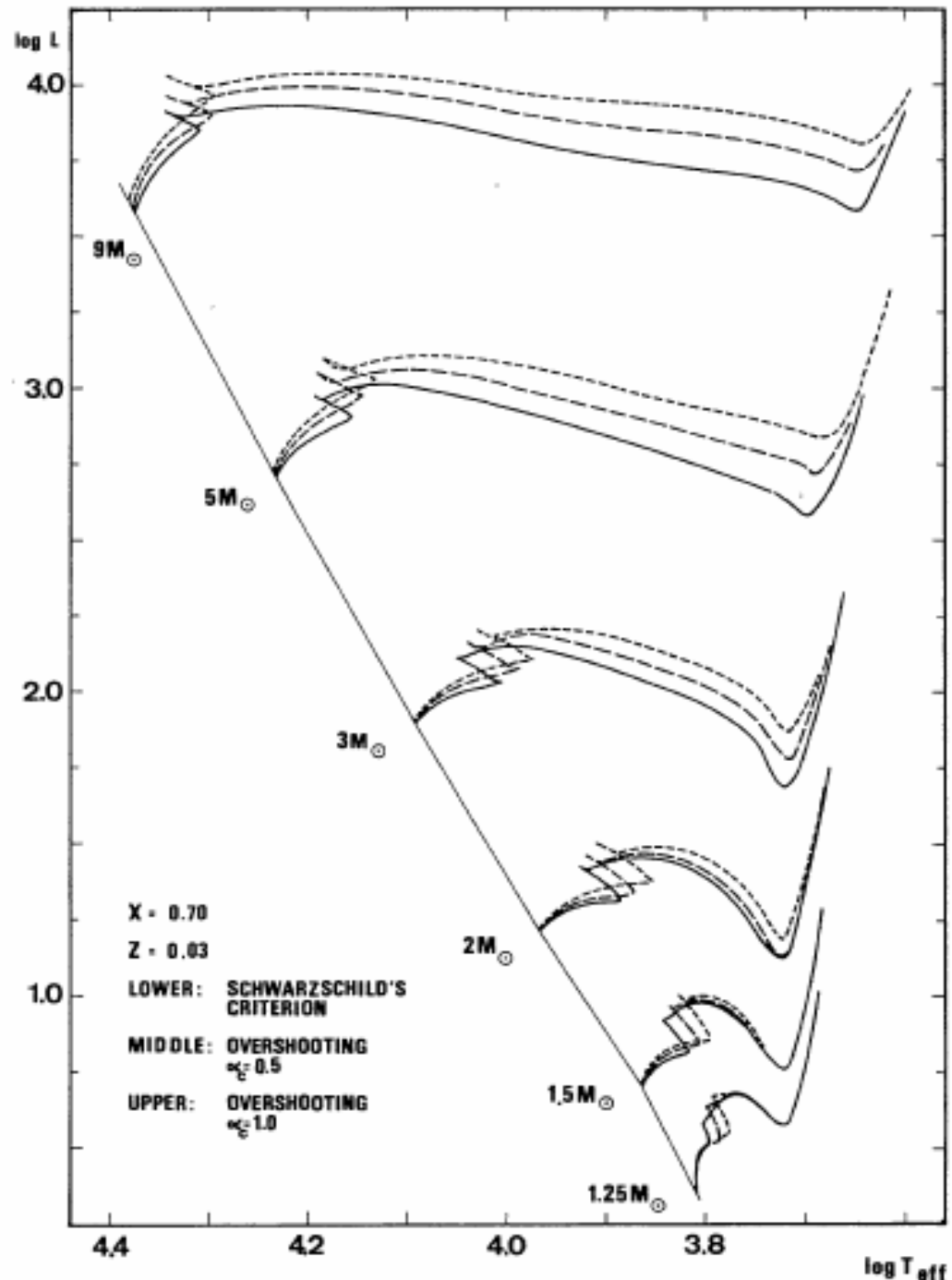
## Unterschied der Isochronen für verschiedene Konvektionsmodelle

Die anderen Effekte verhalten sich ähnlich

Als „Benutzer“ hat man kaum die Möglichkeit, „die Beste“ Isochrone auszuwählen.

Jede Gruppe verkauft natürlich Ihre Isochronen als „die Besten“.

Welche Isochronen gibt es in der Literatur?



# Ein Wald voller Isochronen

- „Padua“: <http://pleiadi.pd.astro.it/>
- Baraffe: <http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?J/A%2bA/337/403>
- „Genf“:  
[http://obswww.unige.ch/~mowlavi/evol/stev\\_database.html](http://obswww.unige.ch/~mowlavi/evol/stev_database.html)
- $\gamma^2$ : <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~yi/yyiso.html>
- Siess: <http://www-astro.ulb.ac.be/~siess/database.html>
- „Granada“: <http://www.iaa.es/~claret/>

TIPP: Es lohnt sich auch die jeweiligen WissenschaftlerInnen direkt anzuschreiben.

# Ein Vergleich der Isochronen

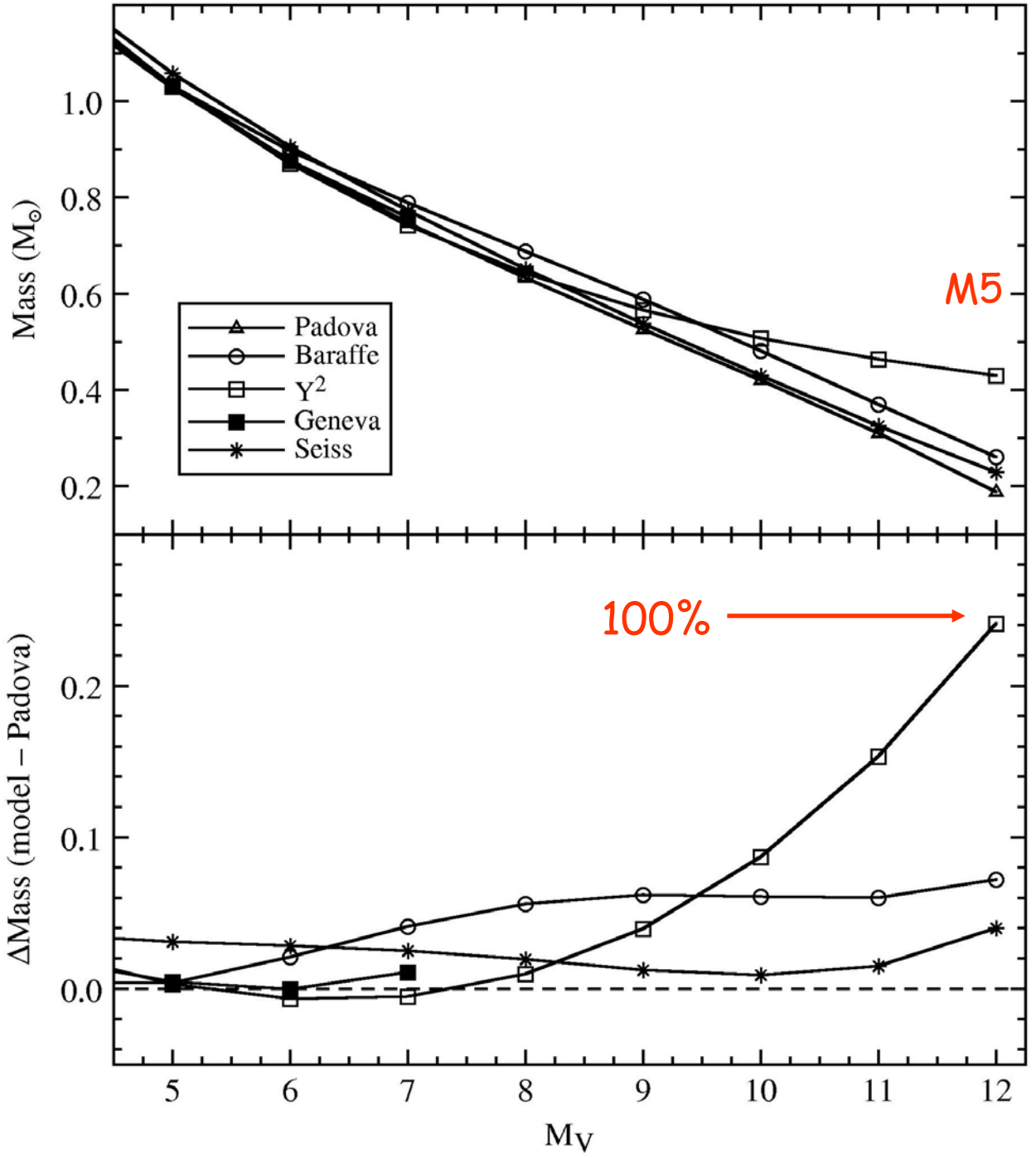
- Grocholski & Sarajedini, 2003, MNRAS, 345, 1015 haben folgende Isochronen verglichen:
  1. "Padua": Girardi et al., 2002, A&A, 391, 195
  2. Baraffe: Baraffe et al., 1998, A&A, 337, 403
  3. "Genf": Lejeune & Schaerer, 2001, A&A, 366, 538
  4.  $Y^2$ : Yi et al., 2001, ApJS, 136, 417
  5. Siess: Siess et al., 2000, A&A, 358, 593

	Padova	Baraffe	Geneva	Y <sup>2</sup>	Siess
Opacity	OPAL (1993) <sup>a</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>	OPAL (?) <sup>c</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>
Low temperature opacity	AF94	AF94	AF94, Kurucz (1991)	AF94	AF94
Equation of state	$T > 10^7$ : Kippenhahn <sup>d</sup> $T < 10^7$ : MHD <sup>e</sup>	SCVH <sup>f</sup>	Maeder & Meynet (1989)	OPAL (1996) <sup>b</sup>	based on Pols et al. (1995)
Core overshoot	$0.25H_p$ for $M \geq 1.5M_\odot$	none	$0.2H_p$ for $M \geq 1.5M_\odot$	$0.2H_p$ for $age \leq 2Gyr$	$0.2H_p$ for $Z = 0.02$ (all others = 0)
Mixing length, $\alpha$	1.68	1.9	1.6	1.7431	1.605
He abundance	$Y_p = 0.23$	$Y_{solar} = 0.282$	$Y_p = 0.24$	$Y_p = 0.23$	$Y_p = 0.235$
He enrichment, $\frac{\Delta Y}{\Delta Z}$	2.25	n/a	2.5 for $Z > 0.02$ 3 for $Z \leq 0.02$	2.0	2.0
Synthetic photometry	ATLAS9 <sup>g</sup> DUSTY99 <sup>h</sup> Fluks et al. (1994)	NextGen <sup>i</sup>	BaSeL-2.2 <sup>j</sup>	BaSeL-2.2 <sup>j</sup>	Siess et al. (1997)

Jede beliebige Kombination von Modellen und Parametern

Vergleich der  
unterschiedlichen  
Massen bei  
konstantem  $M_V$

Nulllinie ist die  
Isochrone der  
Padua Gruppe



# Antworten

Welche Isochronen sind astrophysikalisch „am neusten Stand“?

	Padova	Baraffe	Geneva	Y <sup>2</sup>	Stess
Opacity	OPAL (1993) <sup>a</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>	OPAL (?) <sup>c</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>	OPAL (1996) <sup>b</sup>

OPAL, Iglesias & Rogers, 1996, ApJ, 464, 942, noch immer up-to-date, siehe Webseite <http://www-pat.llnl.gov/Research/OPAL/opal.html>

Low temperature opacity	AF94	AF94	AF94, Kurucz (1991)	AF94	AF94
-------------------------	------	------	---------------------	------	------

Aktuelle Opazitäten von Ferguson et al., 2005, ApJ, 623, 585. Hier der Vergleich zu Alexander & Ferguson, 1994, IAU Colloq. 146, 149 (AF94)

Calculation Component	AF94 <sup>c</sup>	Present Work
Equation of State .....	Decoupled gas and dust	Gas and dust in equilibrium
Molecular Opacity .....	$3 \times 10^7$ lines	$8 \times 10^8$ lines
Dust Opacity .....	Six species CDE	31 species Mie
Number of Wavelengths .....	9000	24,000+



	Padova	Baraffe	Geneva	Y <sup>2</sup>	Siess
Equation of state	$T > 10^7$ : Kippenhahn <sup>d</sup> $T < 10^7$ : MHD <sup>e</sup>	SCVH <sup>f</sup>	Maeder & Meynet (1989)	OPAL (1996) <sup>b</sup>	based on Pols et al. (1995)

Test prinzipiell über Helio- und Asteroseismologie möglich, aber noch keinen wesentlichen Unterschiede gefunden, d.h. hier keine „Wertung“ möglich

Core overshoot	$0.25H_p$ for $M \geq 1.5M_{\odot}$	none	$0.2H_p$ for $M \geq 1.5M_{\odot}$	$0.2H_p$ for age $\leq 2Gyr$	$0.2H_p$ for $Z = 0.02$ (all others = 0)
----------------	--	------	---------------------------------------	---------------------------------	---

Standardwert  $0.2H_p$ , durch verschiedene Tests als „bester Mittelwert“ bestätigt

Mixing length, $\alpha$	1.68	1.9	1.6	1.7431	1.605
-------------------------	------	-----	-----	--------	-------

Werte zwischen 1.5 und 2.0 sind mit allen Beobachtungen kompatibel, für die Sonne ist ein Wert von 1.65 - 1.75 ermittelt worden, siehe Palmieri et al., 2002, A&A, 392, 115

---

---

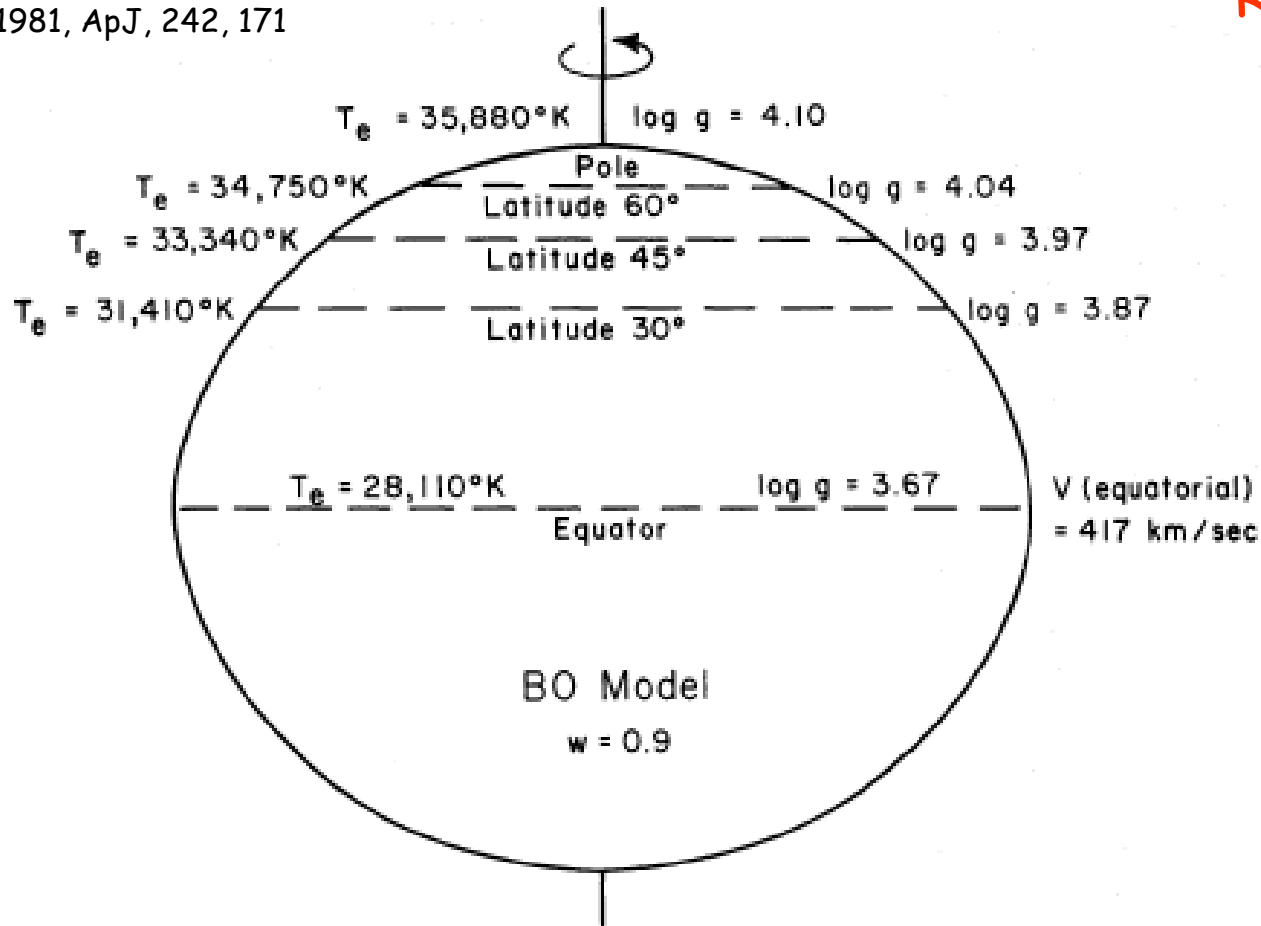
	Padova	Baraffe	Geneva	$Y^2$	Stiess
He abundance	$Y_p = 0.23$	$Y_{\text{solar}} = 0.282$	$Y_p = 0.24$	$Y_p = 0.23$	$Y_p = 0.235$

---

Asplund et al., 2005, *ASPC*, 336, 25:  $Y = 0.2486$

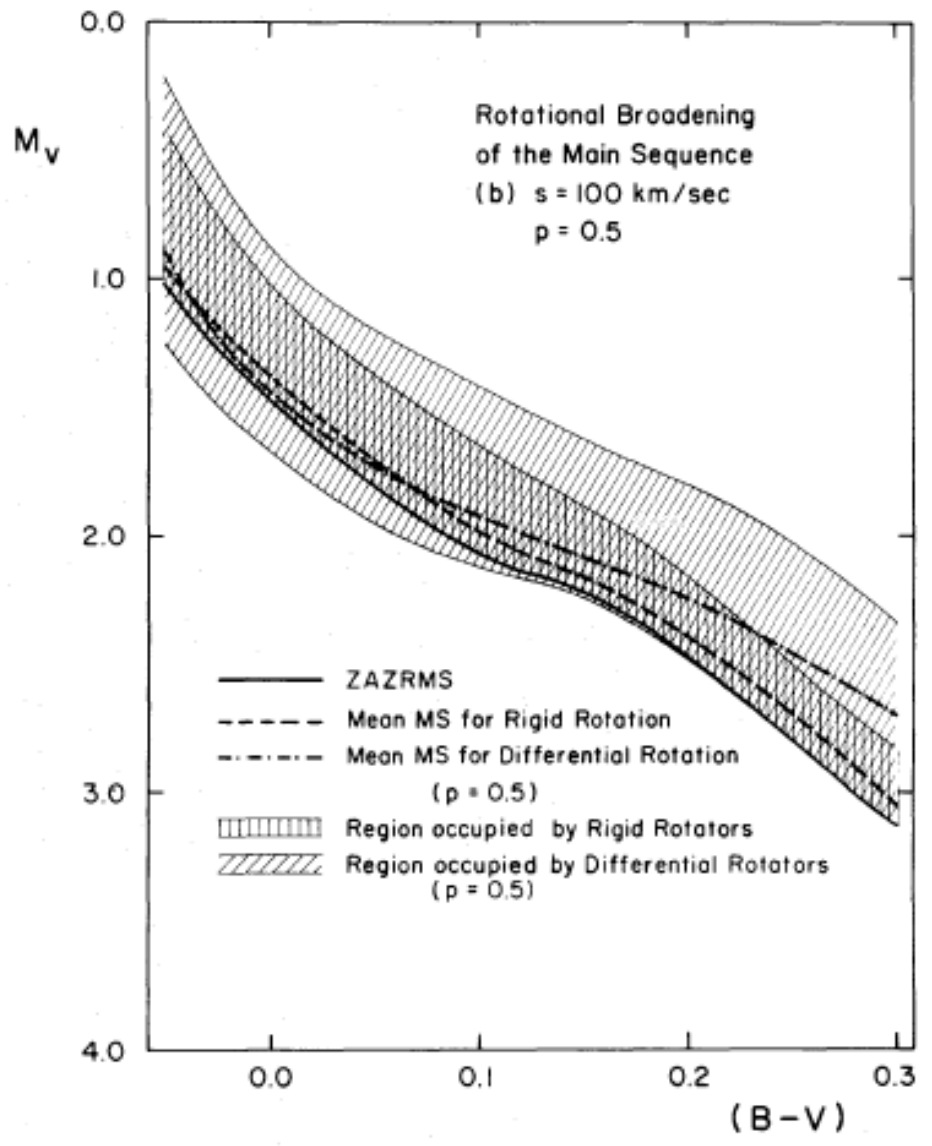
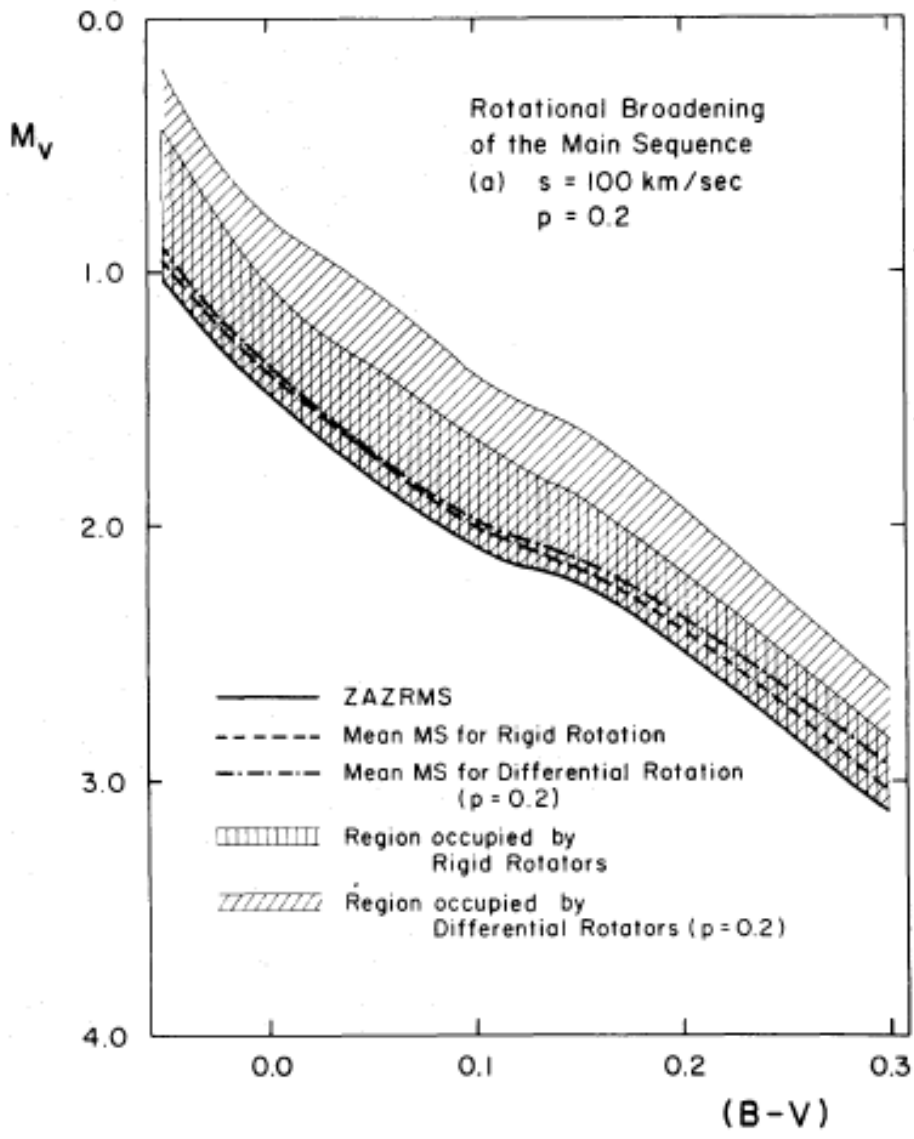
## Fazit:

keine der publizierten Isochronen ist am aktuellen Stand der astrophysikalischen Forschung.



Energieproduktionsrate  $\epsilon = (\text{const}) \left( 1 - \frac{\omega^2}{2\pi G\rho} \right)$  Von Zeipel Theorem (1924)

aus der Rotationsgeschwindigkeit  $\Rightarrow \epsilon \Rightarrow T_{\text{eff}}$  und  $L$  ( $\log g$ )



$p$  ... Grad der differentiellen Rotation

MEAN PROJECTED ROTATIONAL VELOCITIES ( $\text{km s}^{-1}$ ) FOR NORMAL STARS

A. Class V											
Type	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	F0
<i>n</i> .....	104	86	143	83	21	36	44	43	25	31	46
$\langle v \sin i \rangle$ .....	150	131	132	124	147	148	138	112	114	132	106
s.e./mean .....	$\pm 7$	7	5	7	13	8	7	8	11	8	7
s.e. ....	$\pm 68$	61	61	64	56	46	45	54	52	44	50
B. Class IV											
Type	A0	A1	A2	A3	A4-A5	A6-A7	A8-A9	F0			
<i>n</i> .....	10	49	57	20	21	21	17	36			
$\langle v \sin i \rangle$ .....	79	63	51	79	107	104	80	83			
s.e./mean .....	$\pm 11$	8	6	13	12	7	12	7			
s.e. ....	$\pm 34$	55	48	57	53	33	50	40			
C. Class III											
Type	A0	A1	A2-A3	A4-A5	A6-A7	A8-F0					
<i>n</i> .....	24	23	21	20	13	18					
$\langle v \sin i \rangle$ .....	62	55	66	65	80	64					
s.e./mean .....	$\pm 14$	13	16	9	13	7					
s.e. ....	67	59	69	40	46	28					
D. Variation with Luminosity and Type											
Type	CLASS II		CLASS Ib		CLASS Ia		CLASS II-Ia				
	A0-F0	A0-F0	A0-F0	A0-F0	A0-F0	A0-F0	A0-A4	A5-F0			
<i>n</i> .....	10	14	9	20	13						
$\langle v \sin i \rangle$ .....	20	23	31	27	21						
s.e./mean .....	$\pm 4$	3	3	$\pm 2$	3						
s.e. ....	$\pm 12$	11	7	+10	11						

Ursachen:

Drehimpuls-  
Verlust

Magnetfeld

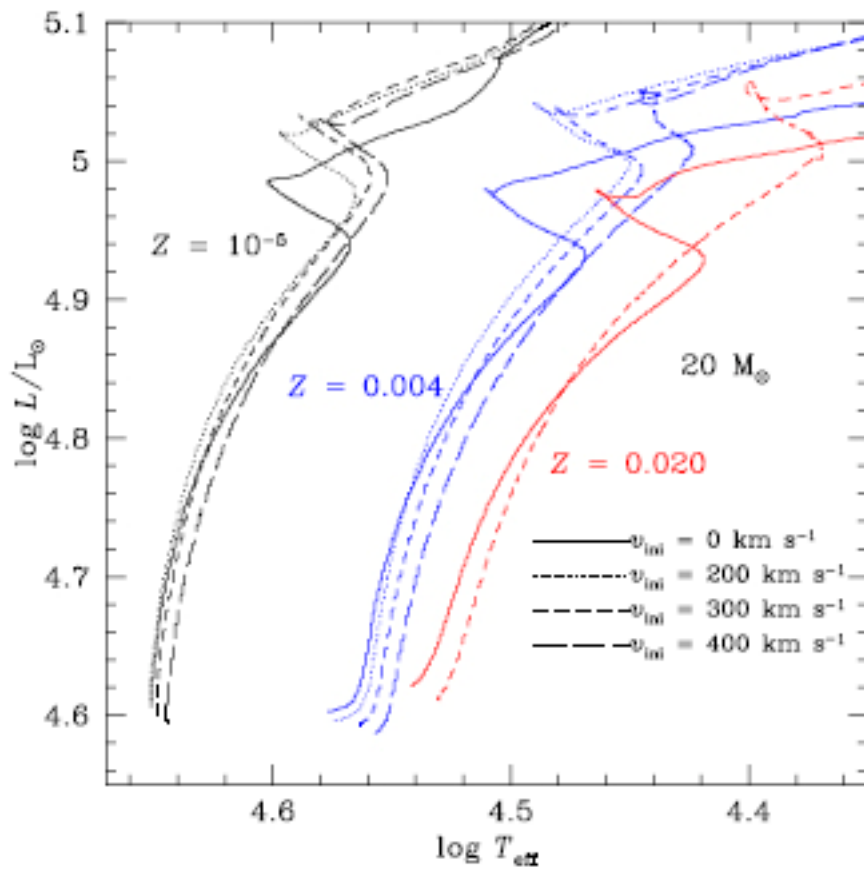
Sternwinde

Alter



# Sternwinde

- Beobachtung: Massenverlustrate, typische Werte
  - Sonne:  $10^{-14}$  M(sun)/yr
  - „Normale Sterne“:  $10^{-10}$  -  $10^{-15}$  M(sun)/yr
  - Wolf-Rayet Sterne:  $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  M(sun)/yr
  - M Überriesen:  $10^{-6}$  M(sun)/yr
- Ursachen:
  - Massenreiche Sterne: Rotation versus Gravitation => Rotation gewinnt
  - Massenarme Sterne: energiereiche Partikel in Korona aufgeheizt



Gruppe um A. Maeder und G. Meynet in Genf:

<http://www.springerlink.com/content/|26vr54528777431/>

Rotation und damit Massenverlust  
Verändert die Isochronen für  
signifikant!

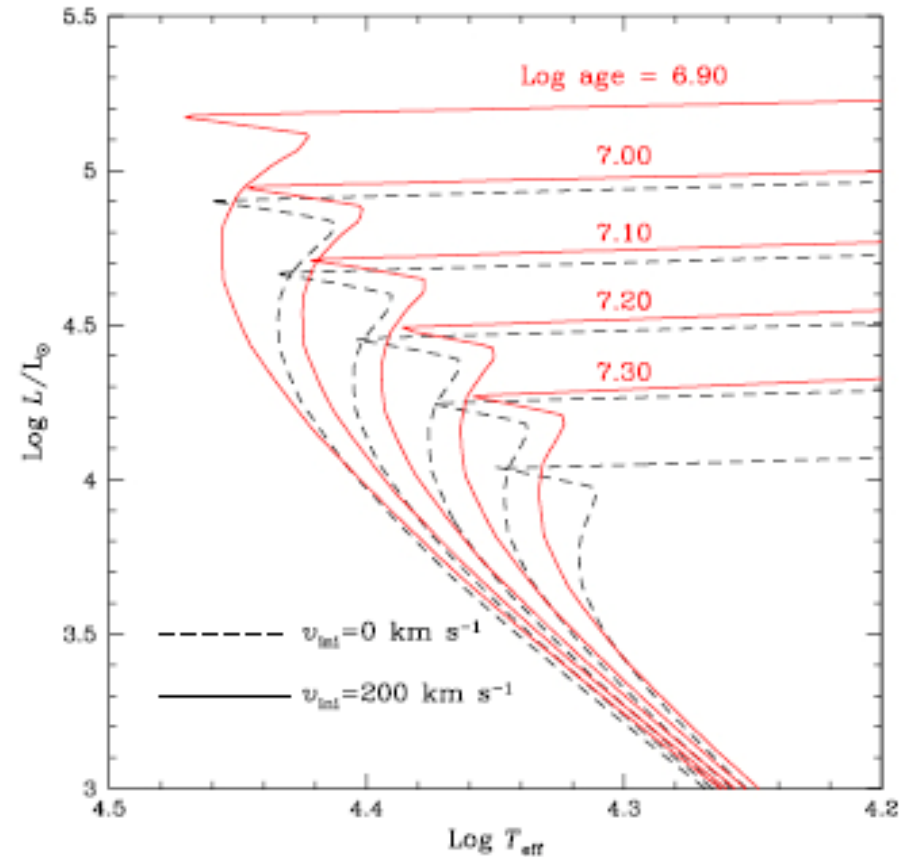


Table 2. Properties of  $20 M_{\odot}$  models at the end of the MS for different initial velocities. The velocities are in  $\text{km s}^{-1}$ , the lifetimes in million years, the masses in solar mass and the surface abundances in mass fraction.

$v_{\text{ini}}$	$\bar{v}$	$t_H$	M	$v$	He	N/C	N/O
0	0	7.350	19.019	0	0.30	0.25	0.12
50	30	7.720	18.896	18	0.30	0.27	0.12
100	62	8.292	18.681	46	0.30	0.45	0.19
200	132	8.901	18.324	94	0.32	1.01	0.38
300	197	9.309	18.020	167	0.35	1.77	0.58
400	253	9.745	17.646	217	0.37	2.54	0.76
500	294	10.275	17.181	213	0.40	3.65	0.99
580	304	10.324	17.148	214	0.39	3.75	1.00

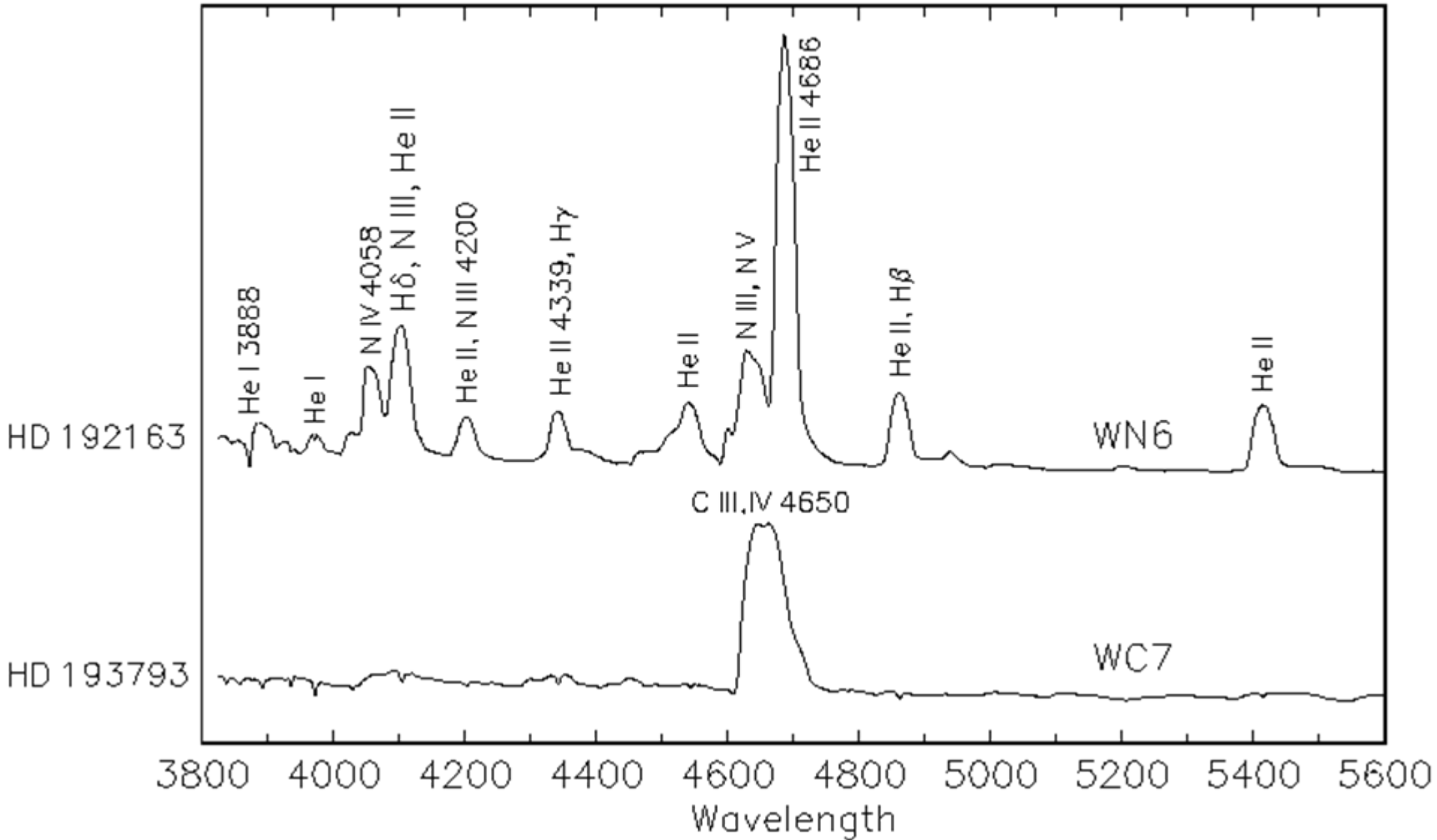
Häufigkeiten durch Massenverlust und Rotation signifikant unterschiedlich!



# Sterne mit spektraler Emission

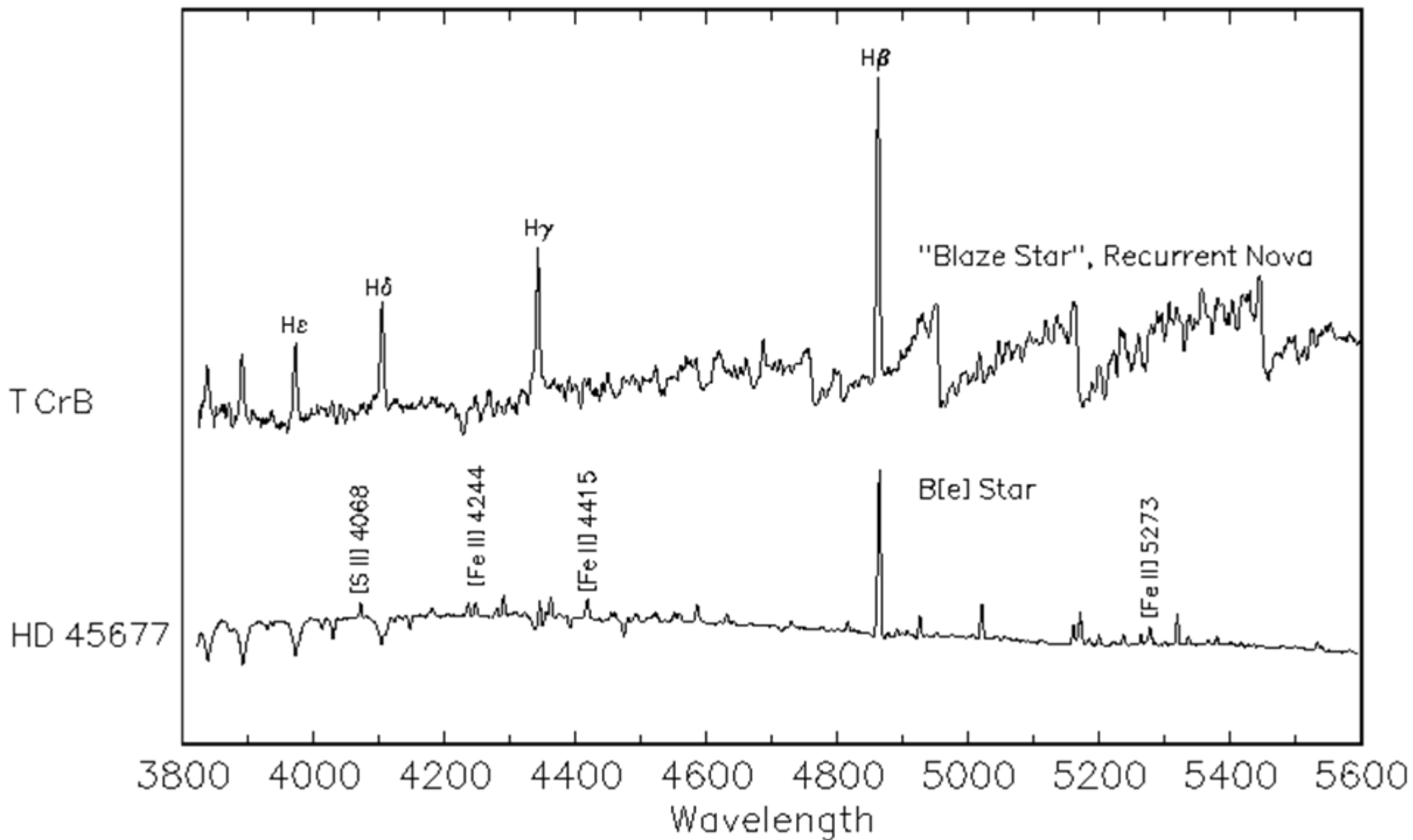
- Massenreich: Wolf-Rayet (WN, WO, WC), P Cygni, OB, ON, OC, BC, BN und Be; Emissionen von H, N, O und C im sichtbaren, Ursache: Sternwind und hohe Temperaturen in den Atmosphären
- Massenarm: vor allem im Röntgenbereich thermische Emissionen, aber auch in Mira Sterne durch Schockwellen in der Atmosphäre
- Keine adäquate Sternatmosphären verfügbar

# Wolf-Rayet Stars

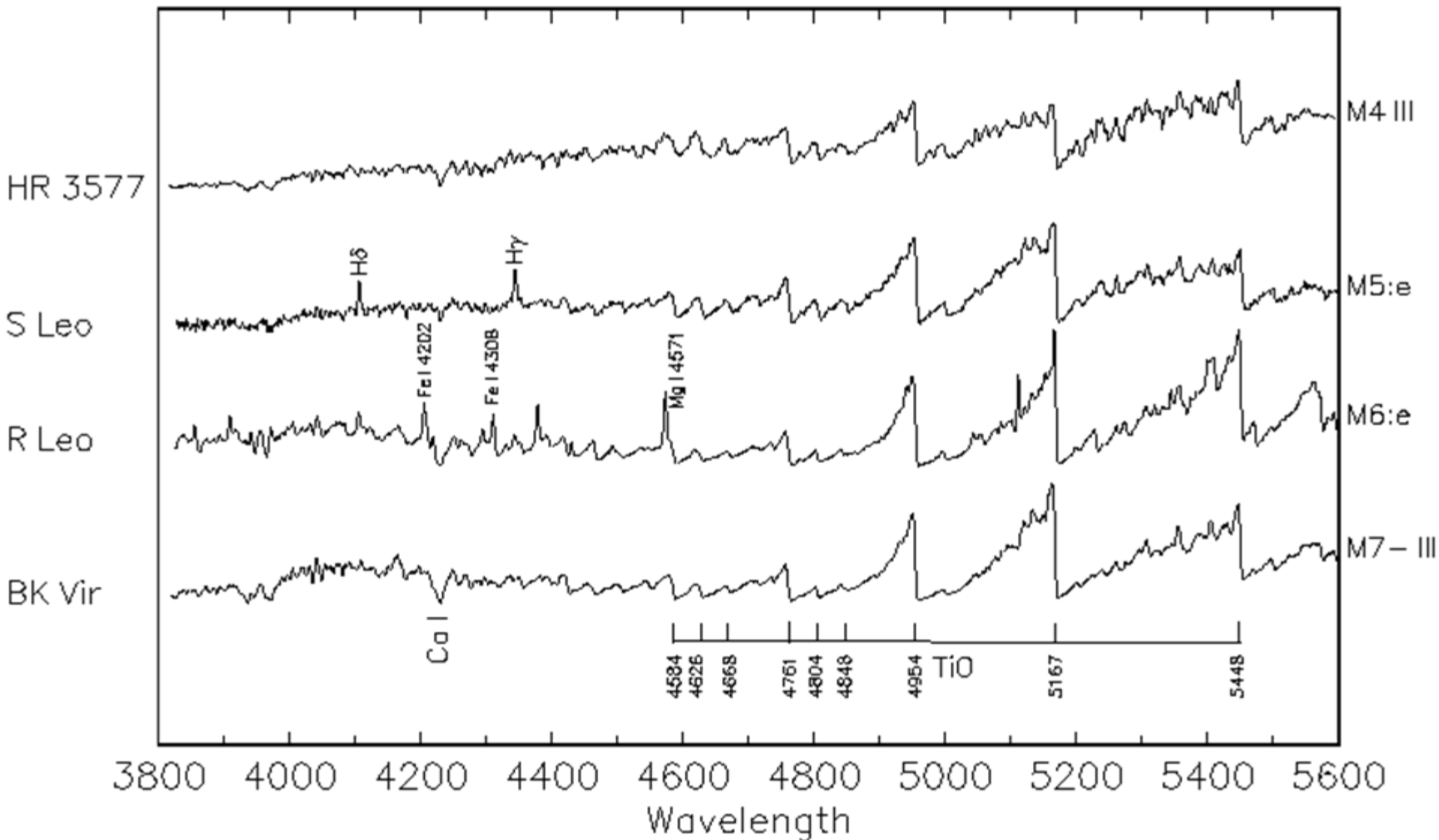


# Two Emission-Line Stars

## Normalized Flux



# Emission Lines in Mira Variable Stars



# Kühler Sterne mit Ca II H&K Aktivität

- The Vienna-KPNO Ca II H&K survey:  
<http://www.aip.de/groups/activity/Ca2HK/survey.html>
- Chromosphärische Aktivität ähnlich wie in der Sonne
- Durch Rotation => Lichtkurve => Doppler Mapping

