

Spaltlose Spektroskopie mit möglichst einfachen Mitteln für Ausbildung und Wissenschaft (?).

BAV Treffen in Hartha - Juni 2023

Dr. Matthias Kolb

Intention des Beitrags

- Einsatz einer extrem einfachen spektroskopischen Methode für Anfänger
- Welche physikalischen Zusammenhänge kann man damit vermitteln?
- Kann man solche Spektroskopie auch für wissenschaftliche Zwecke verwenden?

Einfache Methode

- Spaltlose Spektroskopie mit einem „Filter“-Spektrographen
- Minimalanforderungen:
 - DSLR oder Astrokamera, Star Analyzer 100, Kameraobjektiv mit Adapter für SA 100 / 200
oder wie hier verwendet
 - Kleines Teleskop, Astrokamera mit möglichst großem Sensor (wenn vorhanden SW), 1,25“ Verlängerungshülse(n), Star Analyzer 100 oder 200.
 - Optional noch ein Prisma (als 1,25“ Filter)
 - Montierung mit Nachführung, aber keine extreme Präzision nötig
 - Kein Guiding nötig
 - Keine externe Kalibrierungsquellen
 - Stacking optional
- Sollte alles bis auf den SA / Prisma in jeder Sternwarte vorhanden sein.
 - Investment ca. 150-250€, je nach Wahl des SA / Prisma

Verwendetes Set-up für diesen Beitrag

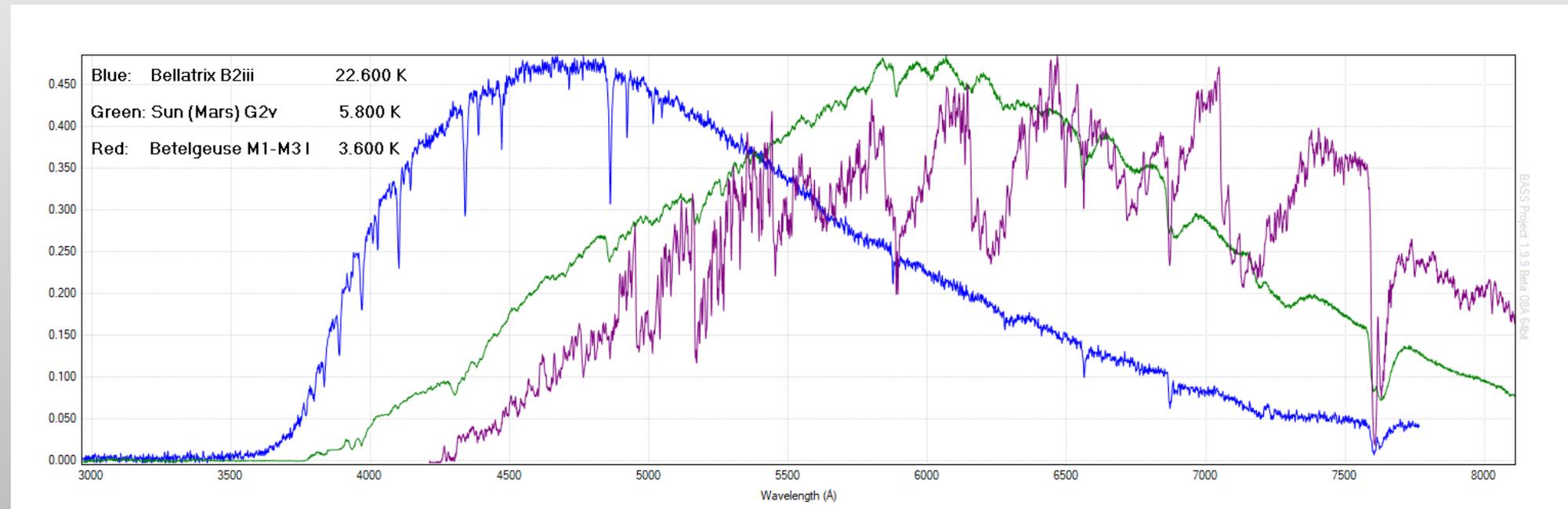
- 70 / 420 mm Refraktor (Triplet, aber nicht nötig).
- Kamera: TS2600 MP:
- SA 100 bzw. 200 sowie 2.6° Prisma
- Verschiedene Verlängerungshülsen, um den Abstand Gitter-Sensor zu vergrößern (bis max. ca. 18 cm)
- Maximale Dispersion: $0.7\text{\AA}^\circ/\text{Pixel}$
- Maximaler R-Wert (λ/FWHM) ~ 1500

Astrophysikalische Themen

- Photosphäre
 - Temperatur und Strahlung insbesondere Wien'sches Verschiebungsgesetz
 - Durchlässigkeit der Atmosphäre
- Spektrallinien (Absorption)
 - Wasserstoff Energieschema, Boltzmann Verteilung
 - Termschemen (Grothian), z.B. Ca II, Na
 - Ionisierungsenergien, Saha Gleichung
 - Elementhäufigkeiten in Sternen
 - Als Ergebnis: Dominierende Spektrallinien zu den Spektralklassen
 - Molekülbanden in Sternen bzw. Planetenatmosphären
- Luminiszenzklassen (Stern-Entwicklungsphasen)
 - Veränderungen der Spektrallinien (Riesen, Zwerge) als Folge der Dichte/Gravitations-Unterschiede
- Doppler-Effekt
 - Doppelsterne
 - Sternwinde - P-Cygni Profile
 - Novae
- Emissionslinien
 - Dekretionsscheibe (Be Sterne)
 - Emissionen in M Sternen

Kontinua der Spektren

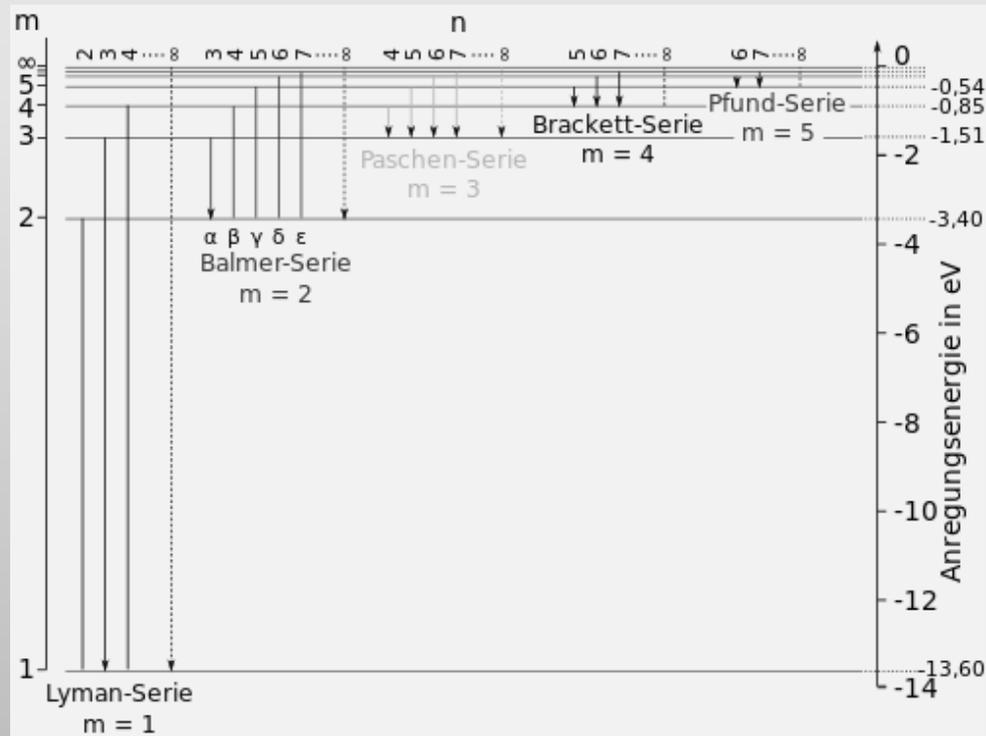
- *Sensorcharakteristik*
- *Durchlässigkeit der Atmosphäre*
- Elektromagnetische Strahlung und Wellenlängenbereiche
- Photosphäre eines Sternes
- Sternenlicht als thermische Strahlung: Verteilung der Intensität nur Funktion der Temperatur
- Wien'sches Verschiebungsgesetz: Mit steigender Temperatur verlagert sich das Maximum ins Blaue
- Spektralklassen grob: O (heiß, blau) bis M (kühl, rot)



Absorptions und Emissionslinien als Übergänge zwischen Energieniveaus

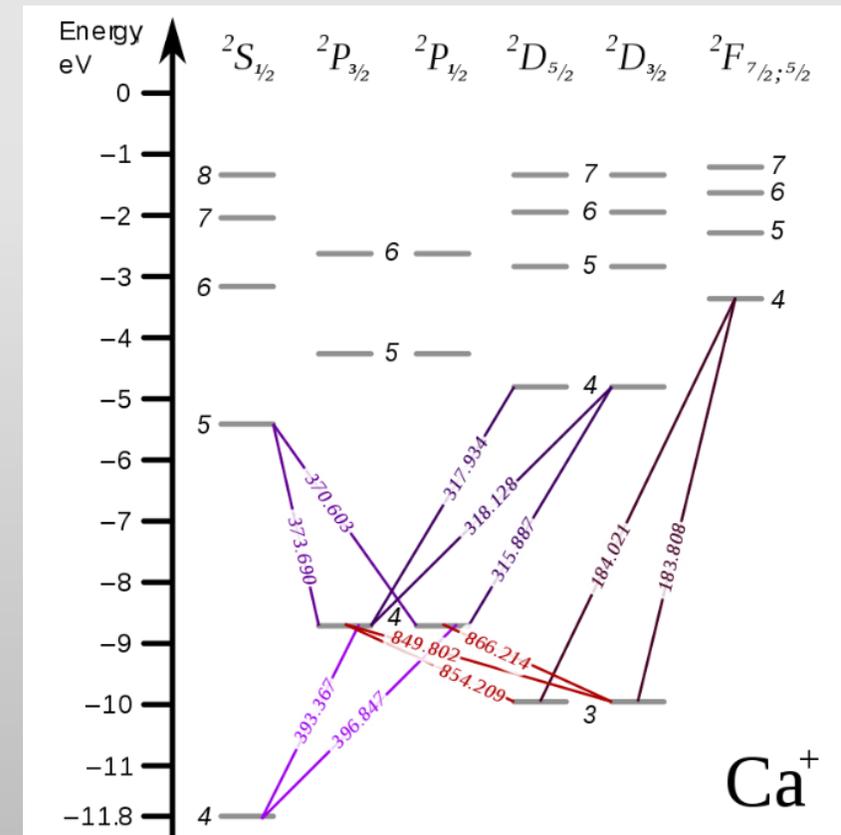
Wasserstoff Term-Schema und Balmer Linien

- $E = h\nu = hc/\lambda$ Umrechnung eV in nm
- Ionisierungsenergie



Ca II Termschema als komplexeres Beispiel

- Aufspaltung der P, D,.. Niveaus
daher Doublets (Ca II H+K, Na I), Triplets (Ca II, Mg I),...



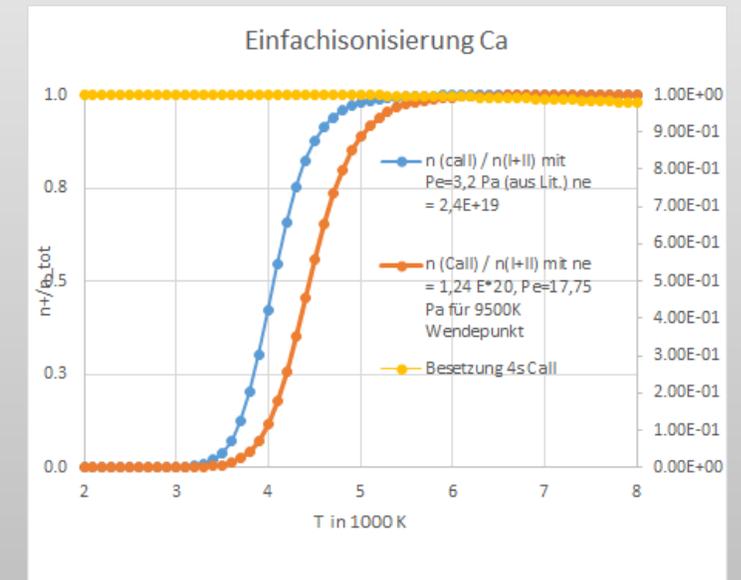
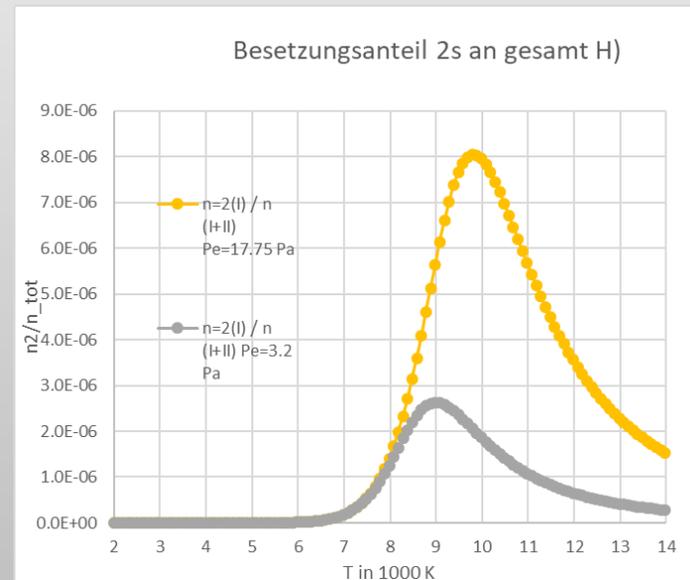
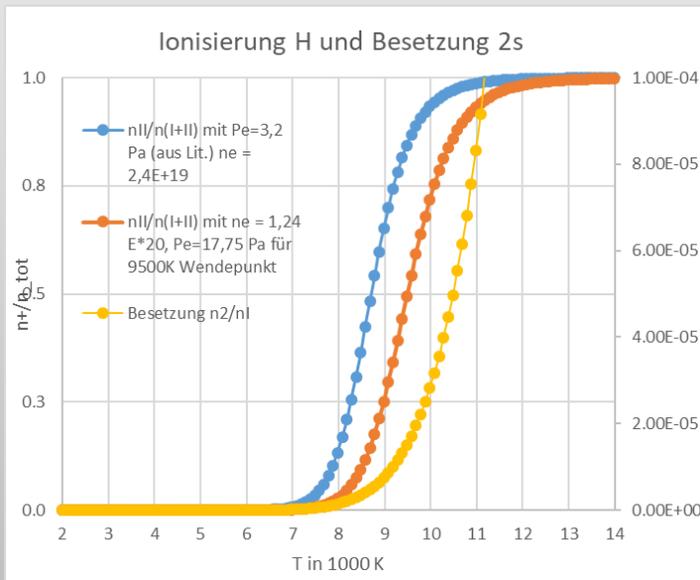
Anregung und Ionisierung – Auswirkung auf Spektren

Boltzmann-Verteilung für die Population der Energieniveaus

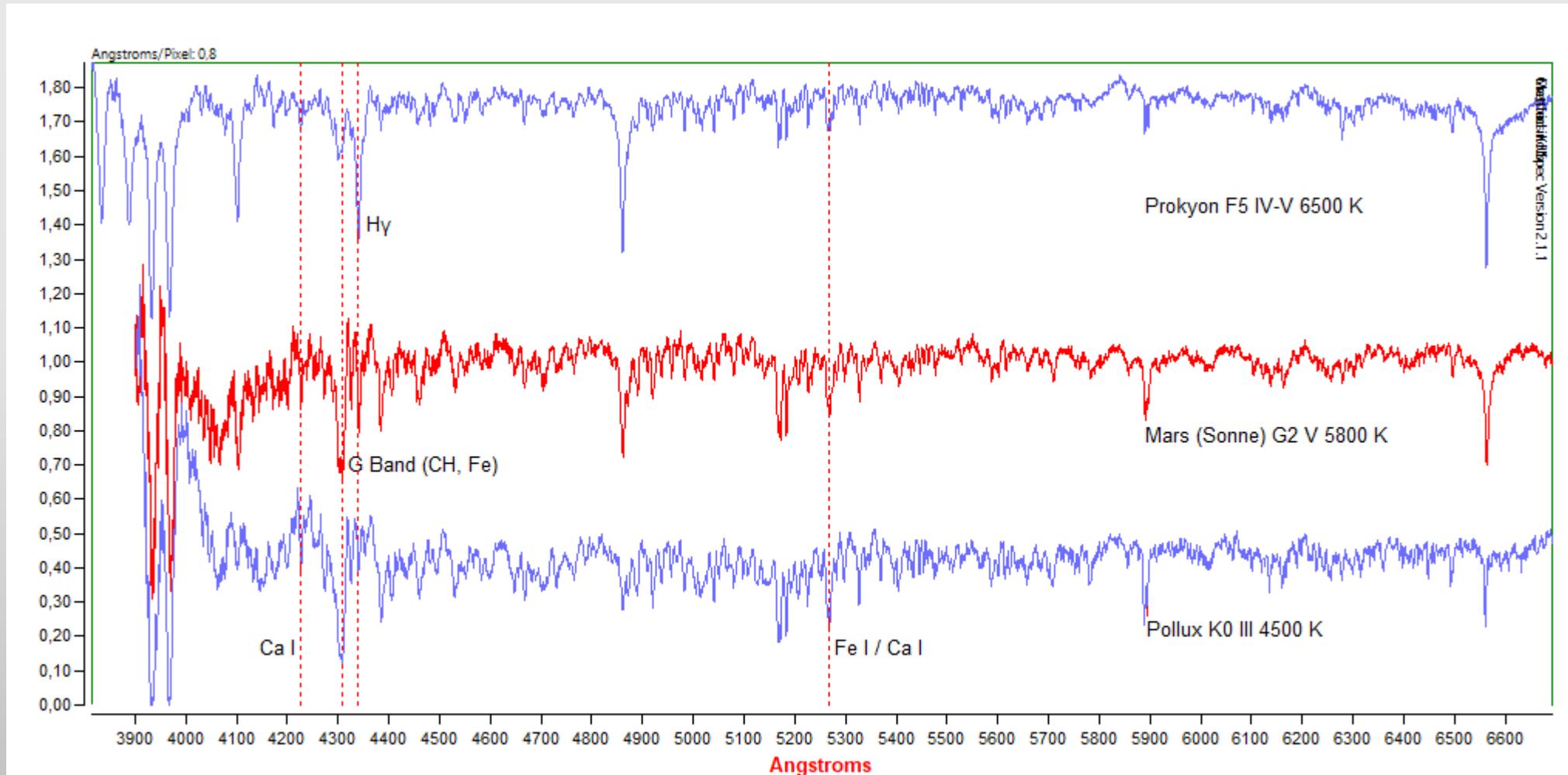
- Besetzungszahl für $n=2$ (Ausgangsniveau der $H\alpha$ Linie) ist bei 5.800 K nur etwa 5×10^{-9} , bei 10.000 K schon 2×10^{-6}
- Hingegen ist beim Ca II das $n=1$ Niveau noch sehr dominant

Saha Gleichung für den Ionisierungsgrad

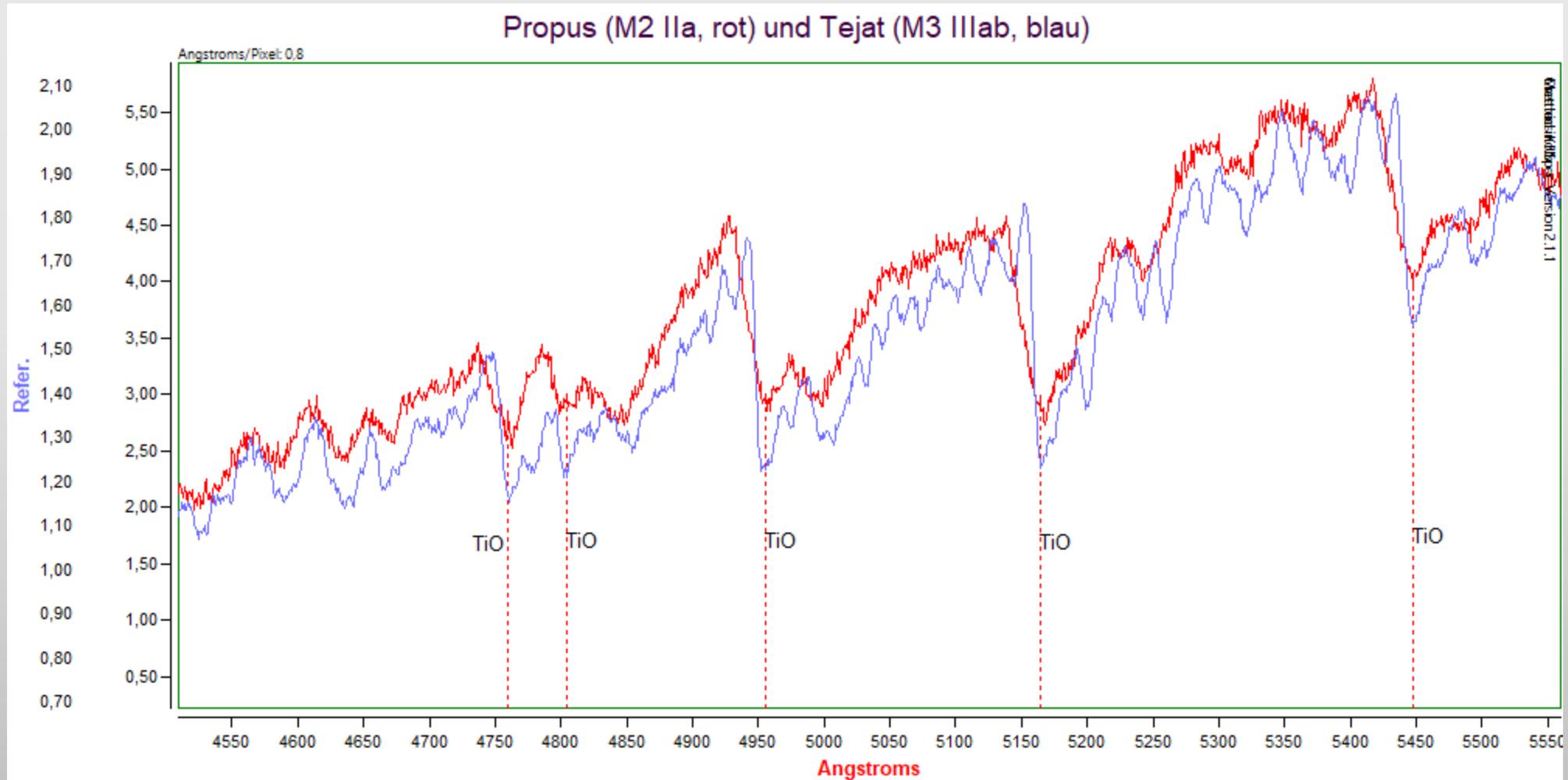
- Anteil der H^+ Ionen liegt bei 5.800 K bei etwa 5×10^{-5} , bei 10.000 K schon bei 0.9!
- Anteil der Ca^+ Ionen bei 5.800 K schon fast 1
- Ca^{++} noch nicht sehr präsent



Temperaturabhängigkeit der Linienintensitäten: F-K



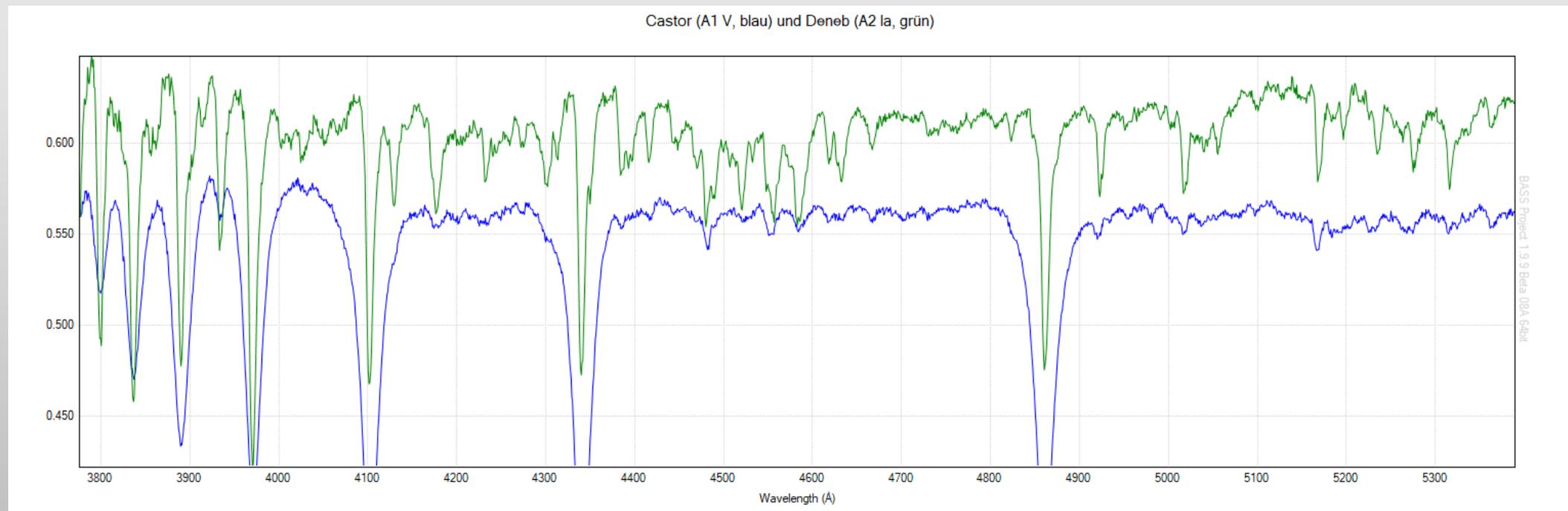
Temperaturabhängigkeit der Linienintensitäten: M2 – M3



Luminosity Effekte

Riesensterne im Vergleich zu Hauptreihensternen

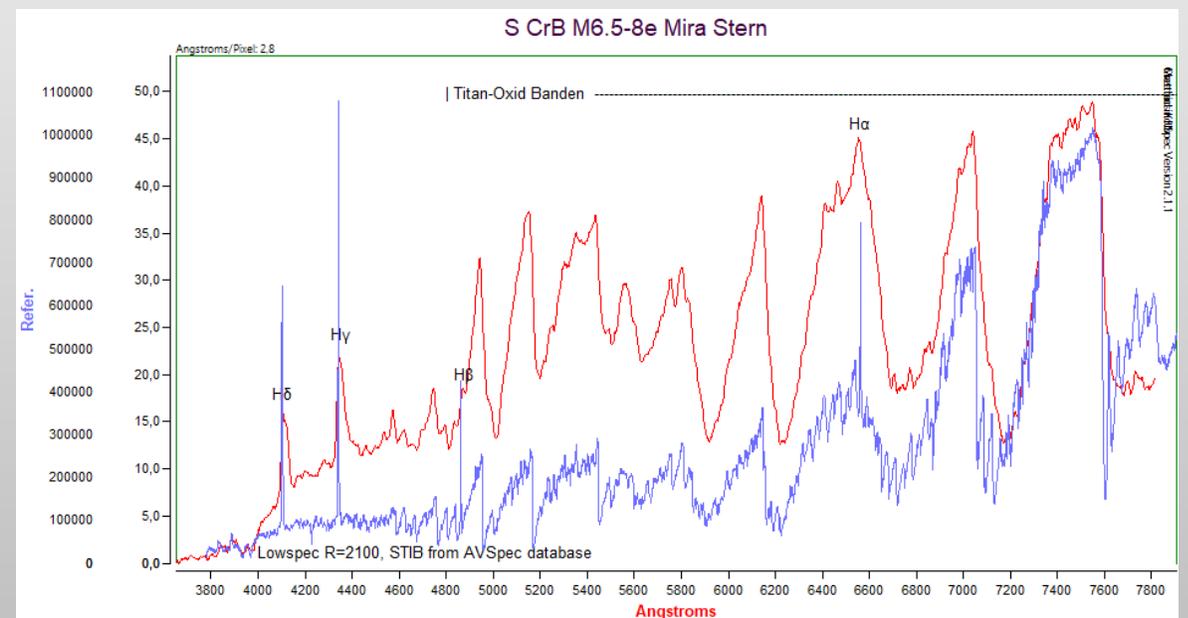
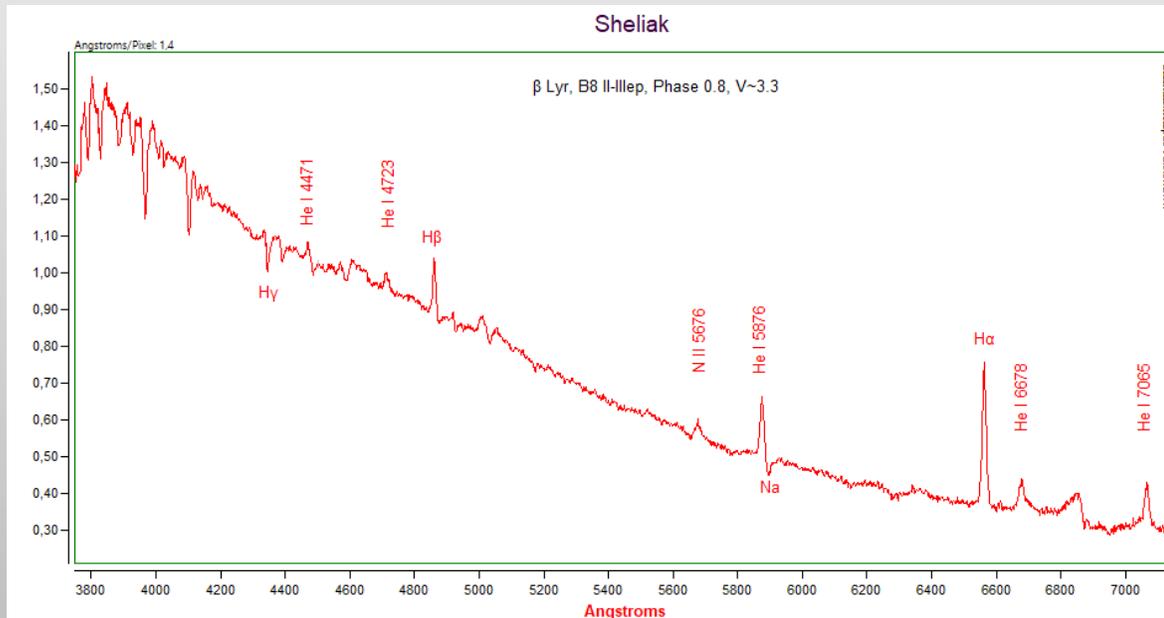
- Großer Radius, höhere Leuchtkraft
- Geringere Dichte in der Photosphäre, geringere Gravitationskraft, dünnere und kleinere H-Linien
- Eventuell P Cygni Profile bei LBV (Luminous Blue Variables)



Emissionslinien in Sternen

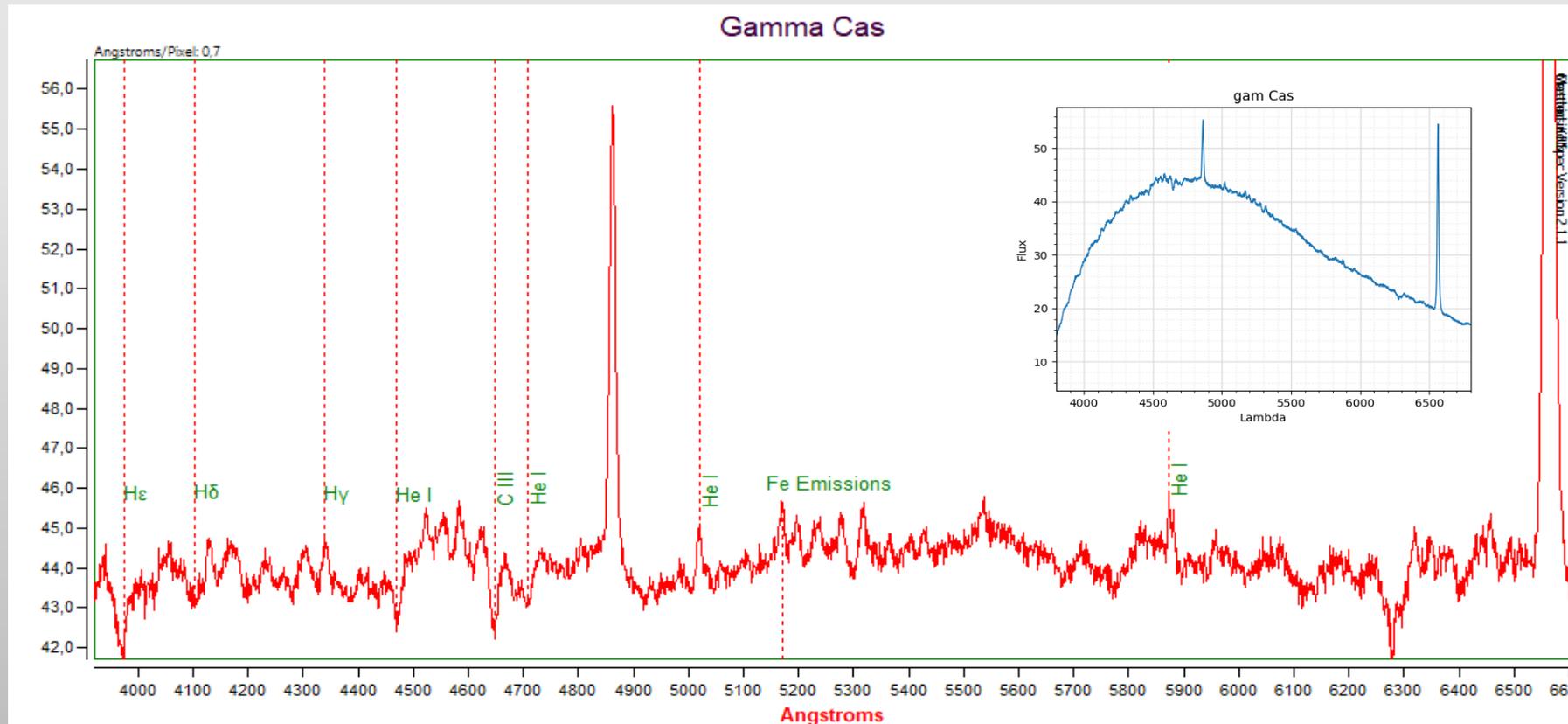
Physikalische Grundlagen für Emissionslinien in Sternen

- Medium geringer Dichte
- Angeregte Zustände werden nicht mehr durch Zusammenstöße der Atome „abgereggt“ sondern durch Strahlung mit $E = h\nu$
- Astrophysikalische Phänomene: Nebel, Scheiben, Winde, Flares



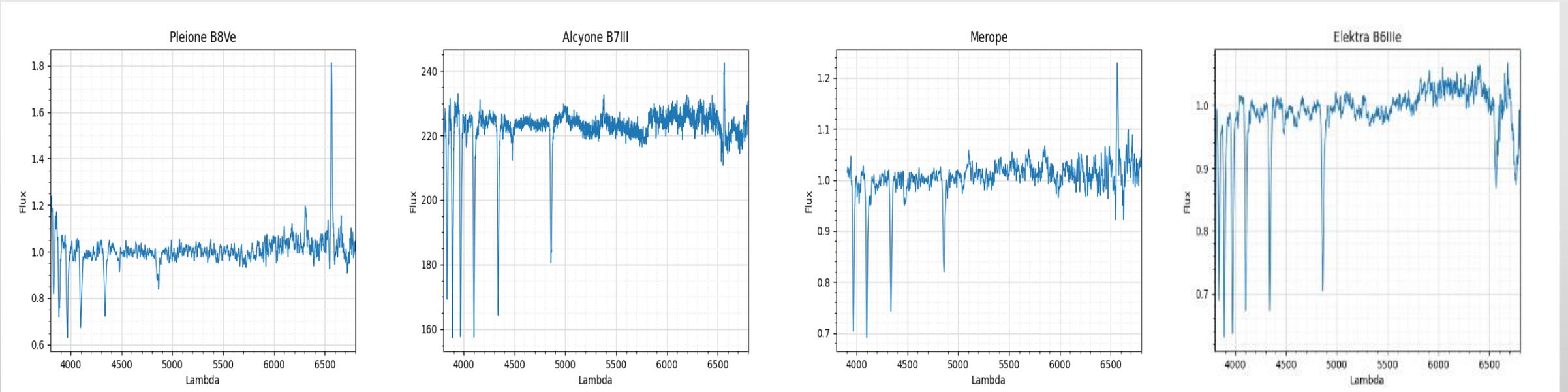
Be Sterne : Emissionen aus Dekretionsscheiben

- Be Sterne rotieren extrem schnell und stoßen dabei Gas ab, das sich in einer sog. Dekretionsscheibe sammelt.
- Hohe UV Strahlung der B Sterne regt Atome in der Scheibe an, die dann Licht abstrahlen



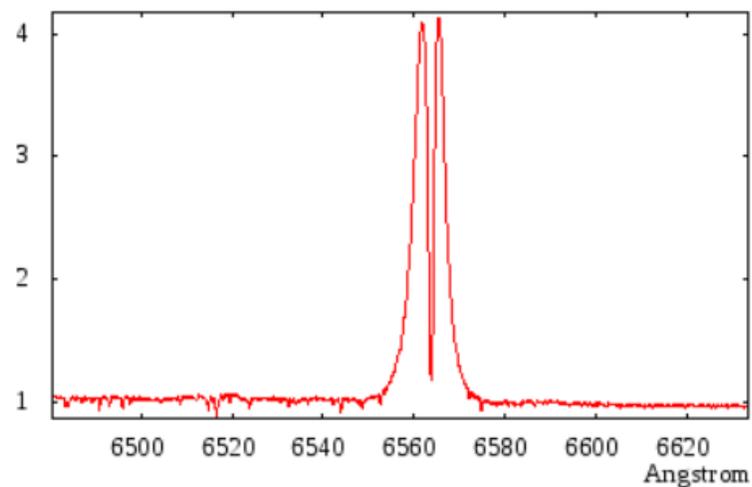
Pleiaden – Be Sterne

- Veränderungen in der Dekretionsscheibe und der Ausrichtung gegenüber der Blickrichtung zum Stern führen zu unterschiedlichen Phasen: Linien zeigen veränderliche Strukturen, teilweise periodisches Verhalten (Pleione)

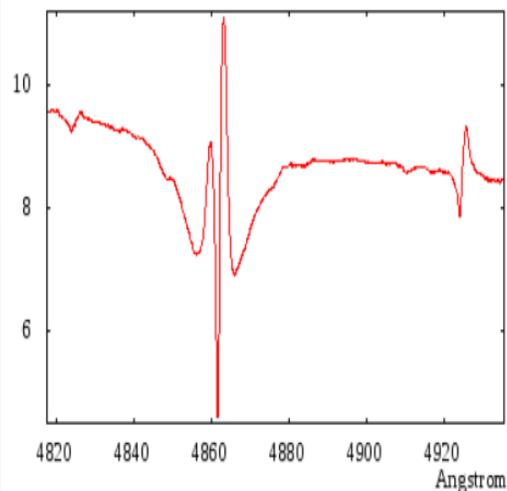


- Gut erkennbar: Emission oder Absorption in $H\alpha$ oder auch $H\beta$ – Phase
- Nicht erkennbar: Innere Struktur der $H\alpha$ Linie

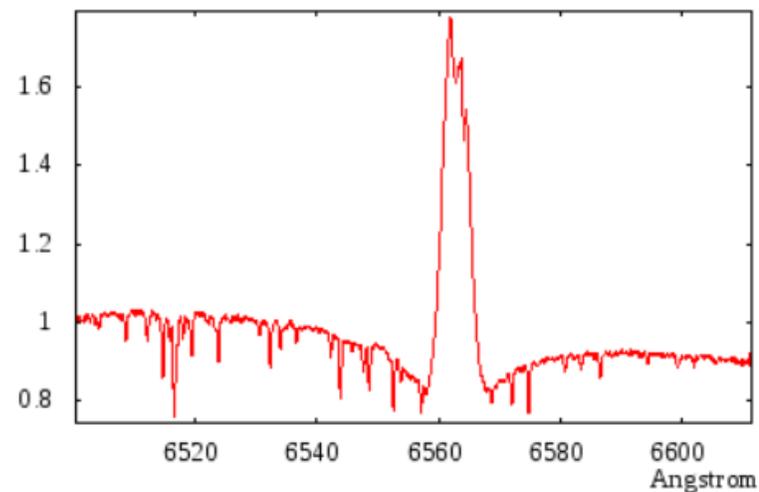
_28tau_20230109_090_Albert Stiewing fits



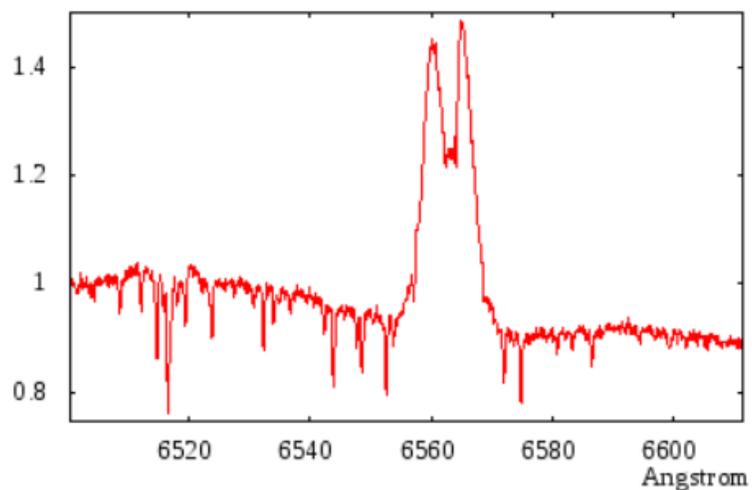
_pleione_20221224_923_46.fits



_hd23630_20221113_903_EBE.fits



_hd23480_20221113_926_EBE.fits



Oben links und Mitte: Pleione:
A.Stiewing, 9.1.23, Lhires3

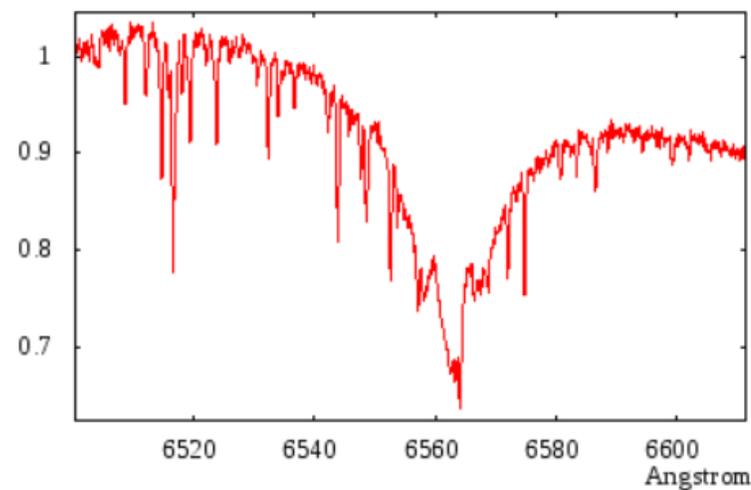
Oben rechts: Alcyone:
E. Bertrand, 13.11.22, Lhires3

Unten links: Merope:
E. Bertrand, 13.11.22, Lhires3

Unten rechts: Electra:
E. Bertrand, 13.11.22, Lhires3

This work has made use of the
BeSS database, operated at LESIA,
Observatoire de Meudon,
France: <http://basebe.obspm.f>

_hd23302_20221113_936_EBE.fits



Doppler-Verschiebungen von Spektrallinien

Dopplerverschiebung

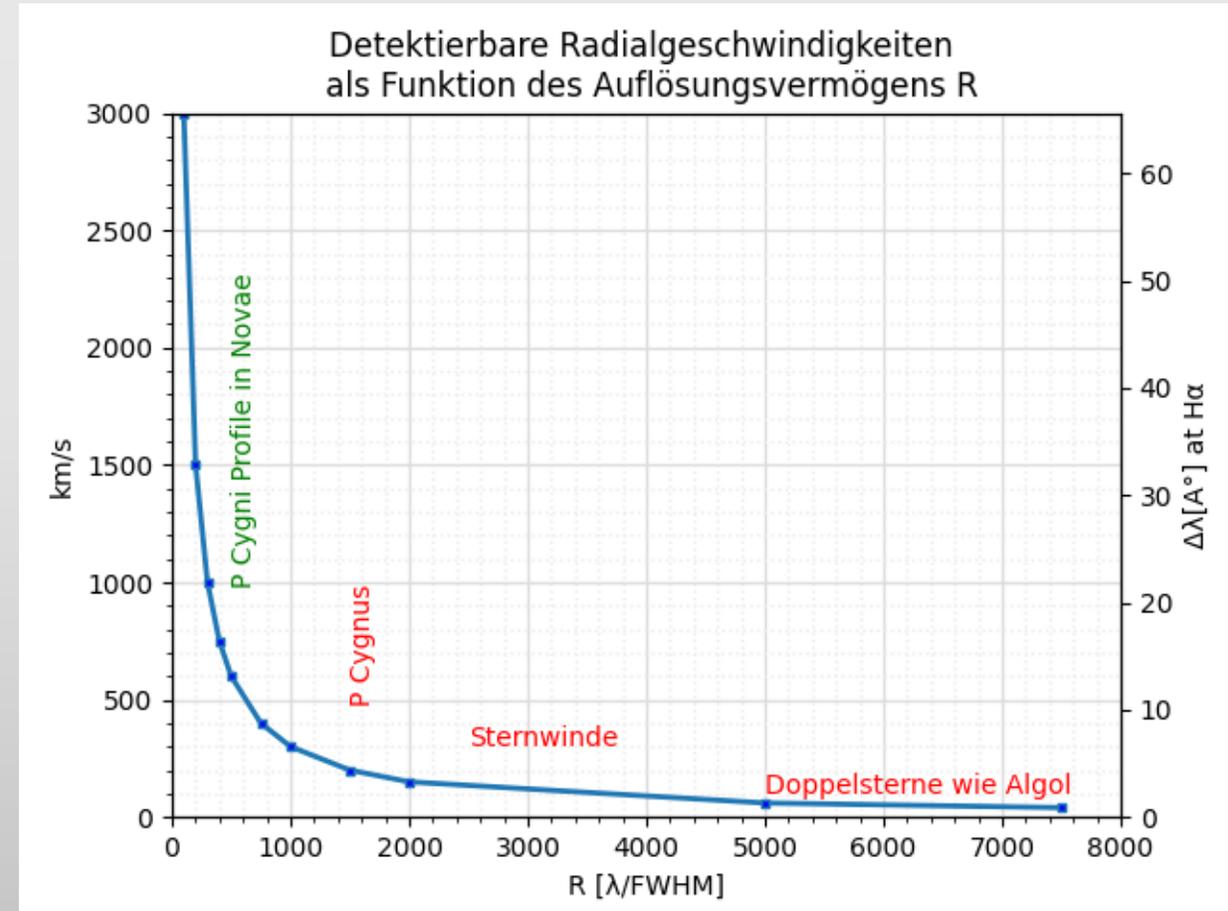
- Spektrallinien verschieben sich, wenn die Quelle auf den Beobachter zu kommt (blau) oder sich entfernt (rot)

$$\Delta\lambda/\lambda = v/c$$

- Beispiel: Doppelsterne (Algol)
 - Typische Radialgeschwindigkeiten um 100 km/s
 - Erfordert hohe Auflösungen

P-Cygni Profile

- Emissionslinie bei oder nahe der Laborwellenlänge
- Vorgelagerte blaue Absorptionslinie durch dünne Materie um den Stern (Winde, Scheiben, Ejekta bei Novae)
 - Radialgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich, teilweise mit geringerer Auflösung nachweisbar.
 - P-Cygni Profile bei Novae variabel (vor und nach Maximum)



Molekülbanden

Banden statt Linien in Molekülen

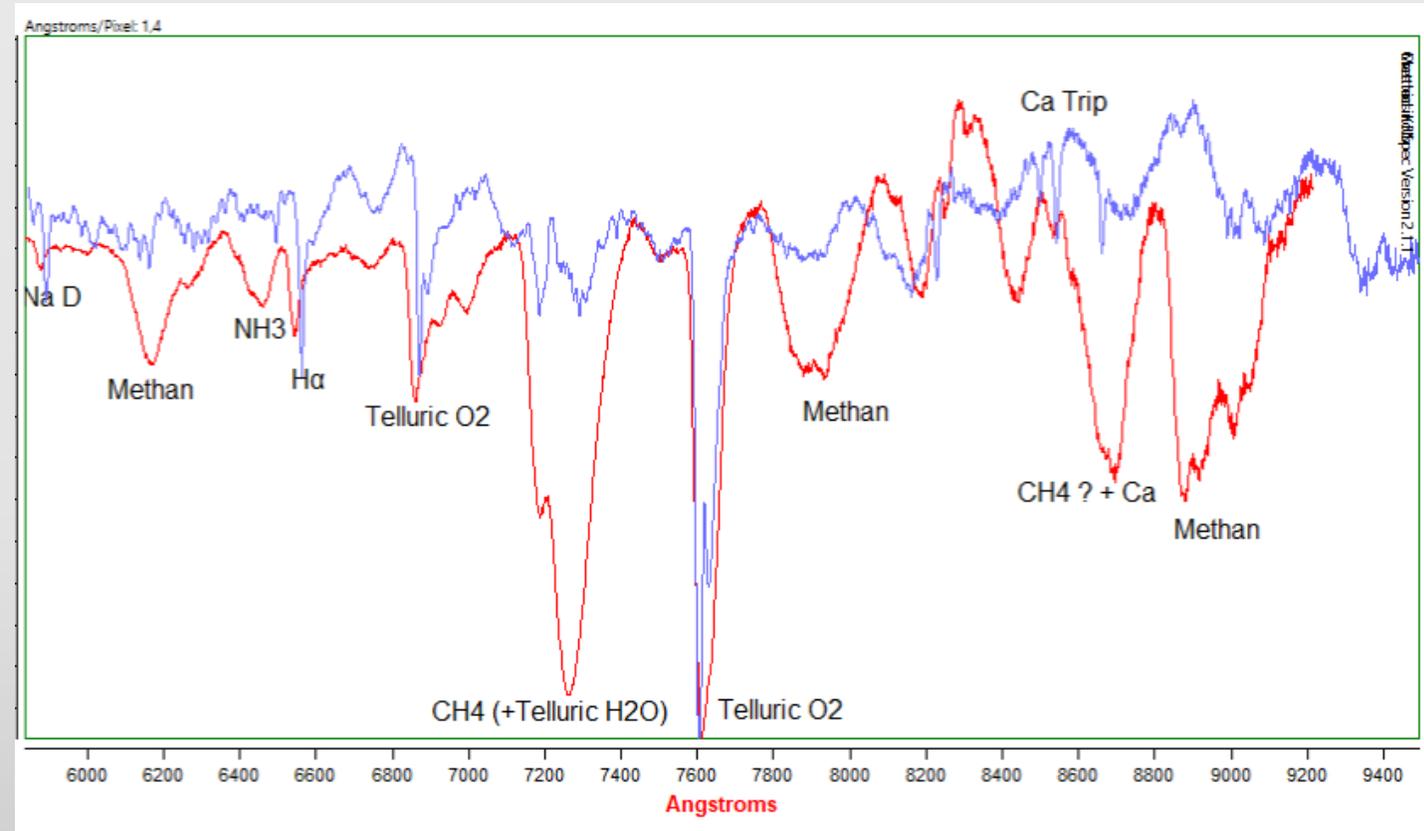
- Banden setzen sich aus vielen Linien zusammen, die es zu einem elektronischen Übergang gibt (Rotation und Schwingungsniveaus)

Moleküle in Sternen

- Moleküle werden in Sternen stabil, wenn die Temperatur niedrig genug ist, um die Dissoziation zu unterdrücken
 - $A + B \rightleftharpoons AB$
 - Radikale wie CH, CN erscheinen zu erst, dann Metalloxide (TiO, VO,...)

Moleküle in Planeten(atmosphären)

- Jupiter mit CH₄, NH₃
- Tellurische Linien (O₂, H₂O)



SA für Ausbildung

Astro-Physik	Sichtbarkeit in Spektren	Star Analyzer (einfaches set-up)
Durchlass von Strahlung in der Erdatmosphäre	In Kombination mit Sensor-Response	gut
Charakter der Strahlung (T), Wien'sches Gesetz	Form des Kontinuums und Lage des Maximums	(mäßig) gut
Energieniveaus in Wasserstoff, Besetzung in Abhängigkeit von der Temperatur (Boltzmann)	Intensitätsanstieg der Balmer Linien mit der Temperatur (von M nach A)	gut
Energieniveaus in schwereren Atomen, Termschema	Existenz von Multipletts (Na, Ca, Mg,...)	gut (bei Ca II, sonst mäßig)
Einfluss der Ionisierung, Saha-Gleichung	Intensitätsabfall der Balmer Linien mit der Temperatur (von A nach O)	gut
Bestimmung der Effektiven Temperatur, Spektralklasse	Maximum Kontinuum, Intensitätsverhältnisse von Linien	passabel
Bestimmung der Luminiszenzklasse (Riese, Zwerg), Einfluss der Dichte auf Linienform	Linienform (schmal), vor allem bei heißeren Sternen	ordentlich, abhängig von R
Metallizität	Metallische Linien und deren Intensitätsverhältnisse	Eher nicht
Moleküle in Sternen und Planetenatmosphären, Rotation und Schwingungen	Banden statt Linien, teilweise Auflösung	gut (Fraunhofer G, tellurisch, Jupiter), sonst eher nein
Emissionslinien: Ursache, in welchen Umgebungen (Nebel, Scheiben, Winde)	Emissionslinien z.B. in Be und M Sternen	gut, Nebel schwer
Doppler Effekt in Doppelsternen, Winden	Verschiebung / Aufspaltung von Linien	Schwer, hohe Auflösung oder Geschwindigkeiten nötig

SA auch für die Wissenschaft?

- Auf Grund der geringen Auflösung natürlich sehr beschränkt
- Beobachtung veränderlicher Sterne, insbesondere in außergewöhnlichen Phasen
 - Novae (und Supernovae)
 - M Sterne wenn Helligkeiten ungewöhnlich sind
 - Be Sterne zu verschiedenen Phasen

Literatur:

- Richard O. Gray, Christopher J. Corbally – Stellar Spectral Classification
- Richard Walker – Spectral Atlas for Amateur Astronomers