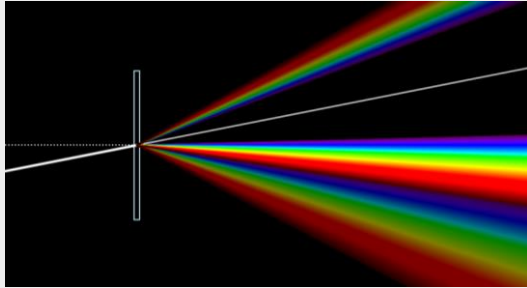
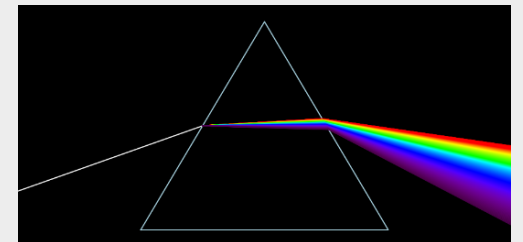


# Spaltlose Spektroskopie mit Transmissionsgittern

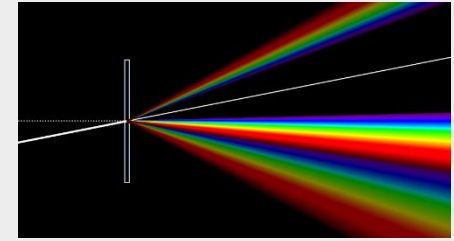


Uwe Zurmühl, Giesen (bei Hildesheim)

- I) Vom Star Analyser zum Grism – Spektroskopie im konvergenten Strahlengang
- II) Hochauflösende Spektroskopie mit dem Objektivgitter
- III) Spektrophotometrie



# Eigene Erfahrungen und Hintergrund



- Studium der Atom- und Kernphysik & Astronomie in Göttingen
- Forschung mit Gamma-Strahlung im MeV-Bereich in Göttingen, Grenoble und am MPI Mainz
- Interesse an Astronomie „seit früher Jugend“, seit ca. 30 Jahren wieder aktiver Amateurastronom
- Ab 2015 Beginn spektroskopischer Aktivitäten (➔ 31. ATT Essen: Stände von Ernst Pollman und Shelyak)
- Kurz darauf erste Versuche mit „Star Analyser 100“ und 200
- Erkenntnis: Die meisten Berichte zur Verwendung des SA100 / SA200 sind fragwürdig bis irreführend...
- Daher: Eigener Weg zur Optimierung der Auflösung
- Einsatz weiterer Gitter von Thorlabs/Edmund Optics mit höherer Dispersion (300 l/mm und mehr)
- Parallel dazu: Tests als Objektivgitter, zunächst die 1“ Gitter, dann 5cm x 5cm Gitter von Thorlabs
- Für hochauflösende Spektroskopie derzeit hauptsächlich ZEISS-Transmissionsgitter (6,5cm x 6,5 cm) verwendet

# Sternwarte Giesen

N 52° 11,96′

O 9° 54,22′



# Spaltlose Spektroskopie - Allgemeines

Der **Spalt** wird quasi ersetzt durch das **Bild des Objektes**, daraus folgt:

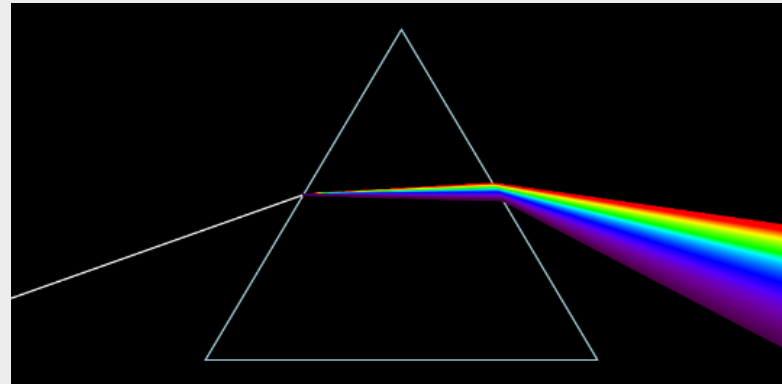
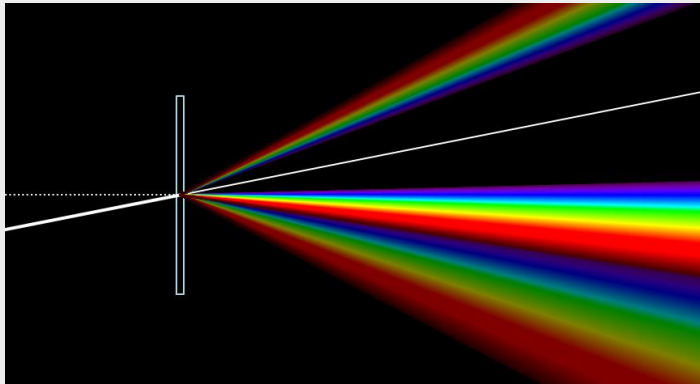
- Im Allgemeinen nur „punktförmige“ Ziele sinnvoll
- Jede Unschärfe (Optik, Luftunruhe, Nachführung,...) wirkt sich auf die Auflösung aus
- Keine feste Beziehung Sensor-Position <-> Wellenlänge, d.h. individuelle Eichung jedes Spektrums nötig
- Absolute Wellenlängeneichung nur eingeschränkt möglich
- Untergrund (Atmosphäre, andere Sterne) prinzipiell höher als bei Verwendung eines Spalts

Vorteile gegenüber Spaltspektrographen:

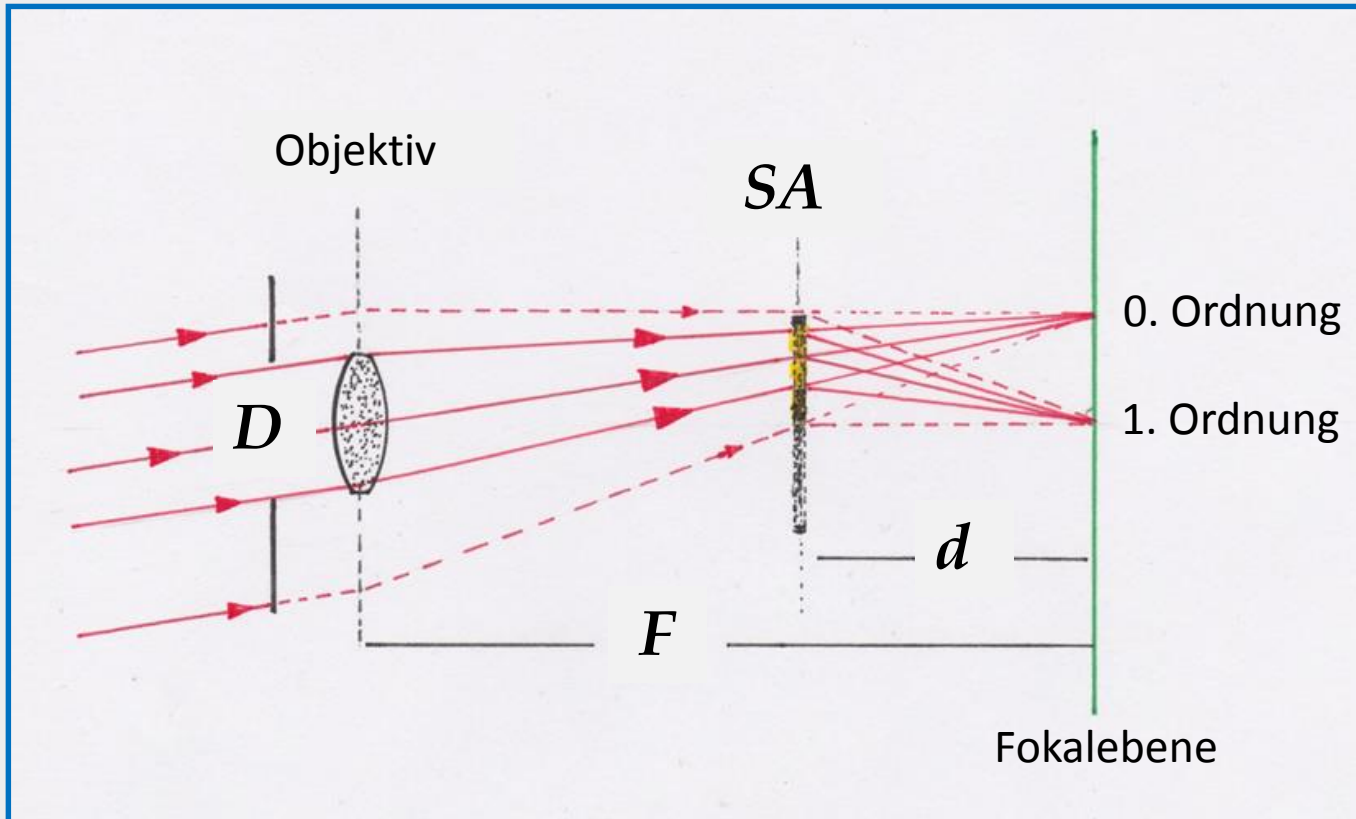
- Einfacher, kostengünstiger Aufbau und unproblematischer Einsatz (z.B. Autoguiding oft verzichtbar)
- Mehrere Objekte können auf einen Schlag gemessen werden (-> Plejaden)
- Spektrophotometrie (relativ) einfach möglich



# I) Vom Star Analyser zum Grism – Spektroskopie im konvergenten Strahlengang



# Prinzipieller Aufbau für konvergenten Strahlengang (ohne Prismen)



→ „Geknickter Strahlengang“

Auflösung verschlechtert durch „Spektrale Koma“:

$$\Delta\lambda_{Coma} = \varepsilon \frac{3\lambda}{8N^2} \quad \varepsilon \approx 0.5$$

$$N = F/D \quad \text{Blende (= 1/Öffnungsverhältnis)}$$

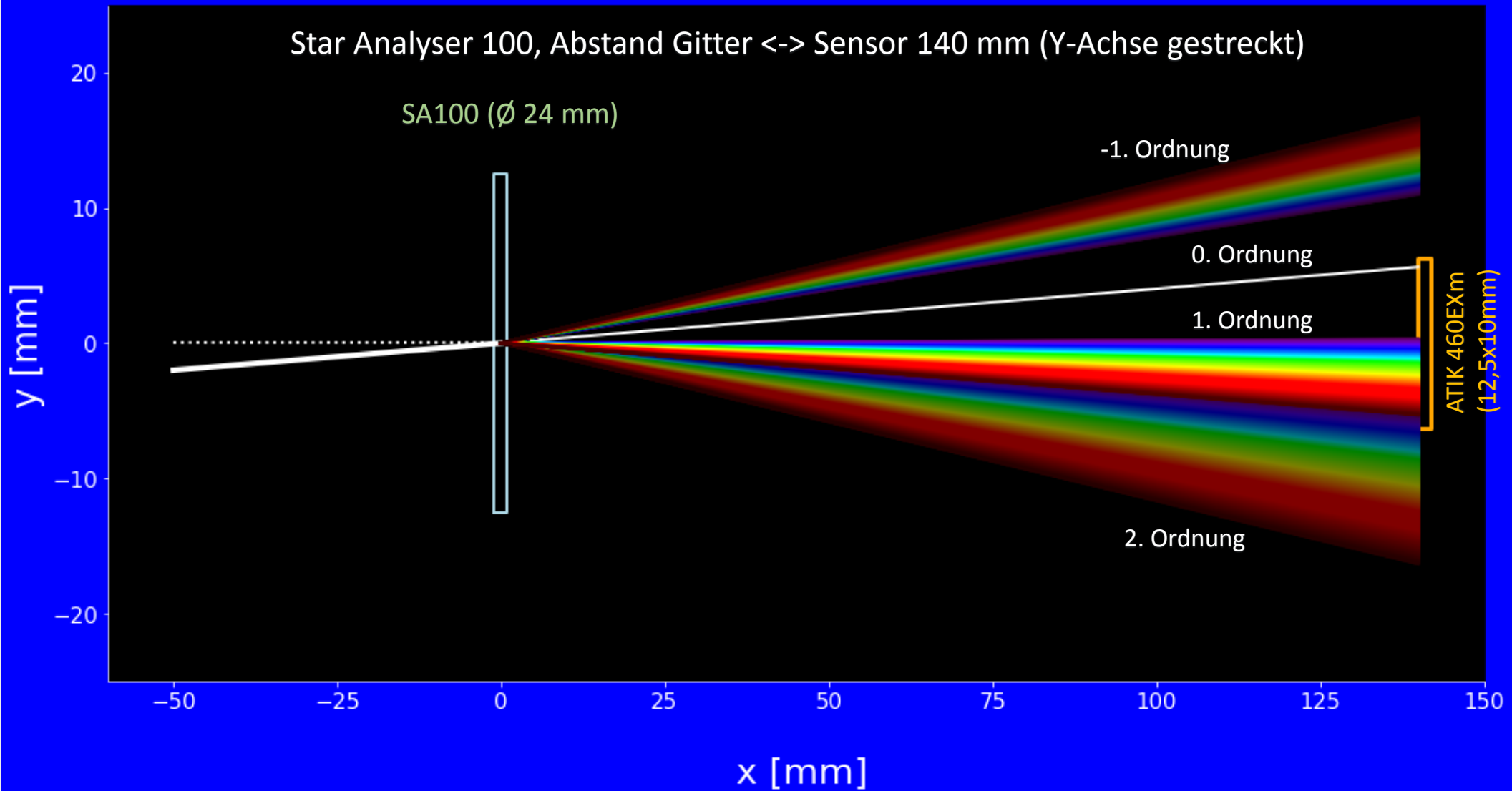
Beispiel:

$$N = 8, \lambda = 6563 \text{ \AA} \rightarrow \Delta\lambda_{Coma} \approx 19 \text{ \AA}$$

$$\text{Beleuchteter Teil des Gitters: } SA_{illum} = d * D/F = d/N$$

$$\text{Abstand für volle Ausleuchtung: } d_{ausgel} = 24 \text{ mm} * N$$

# Strahlengang beim Transmissionsgitter



# Beispiel: Arcturus mit Star Analyser 100 (Abstand SA100 <-> Sensor: 140 mm)

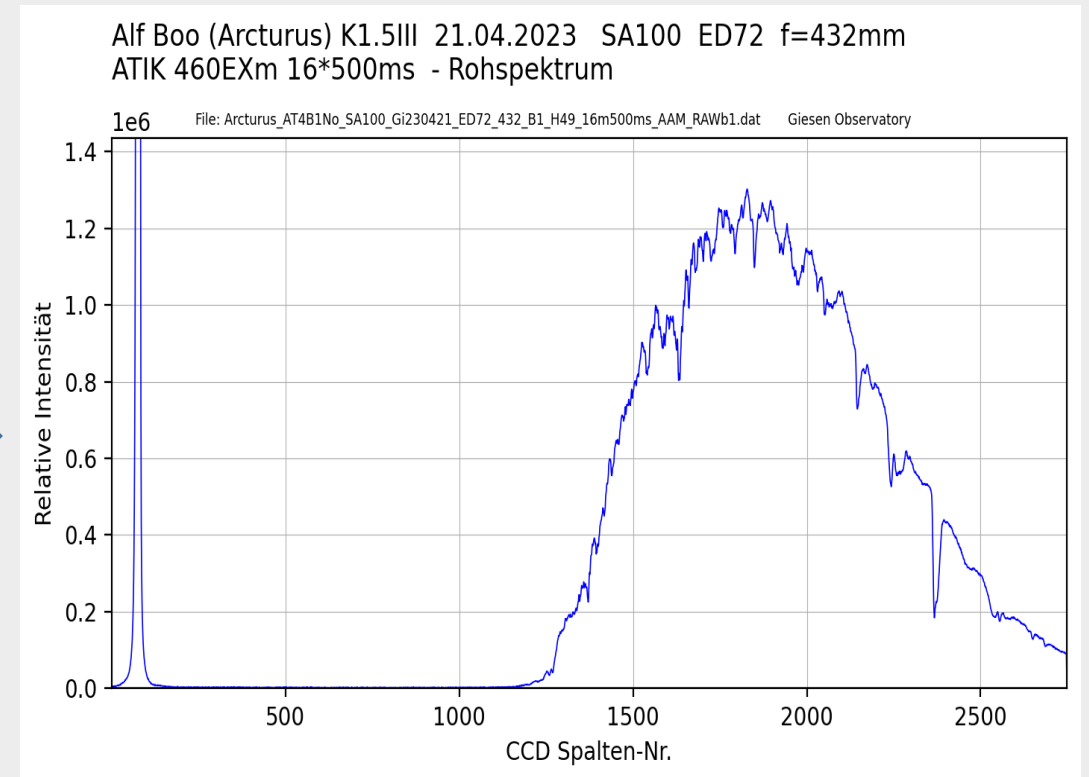
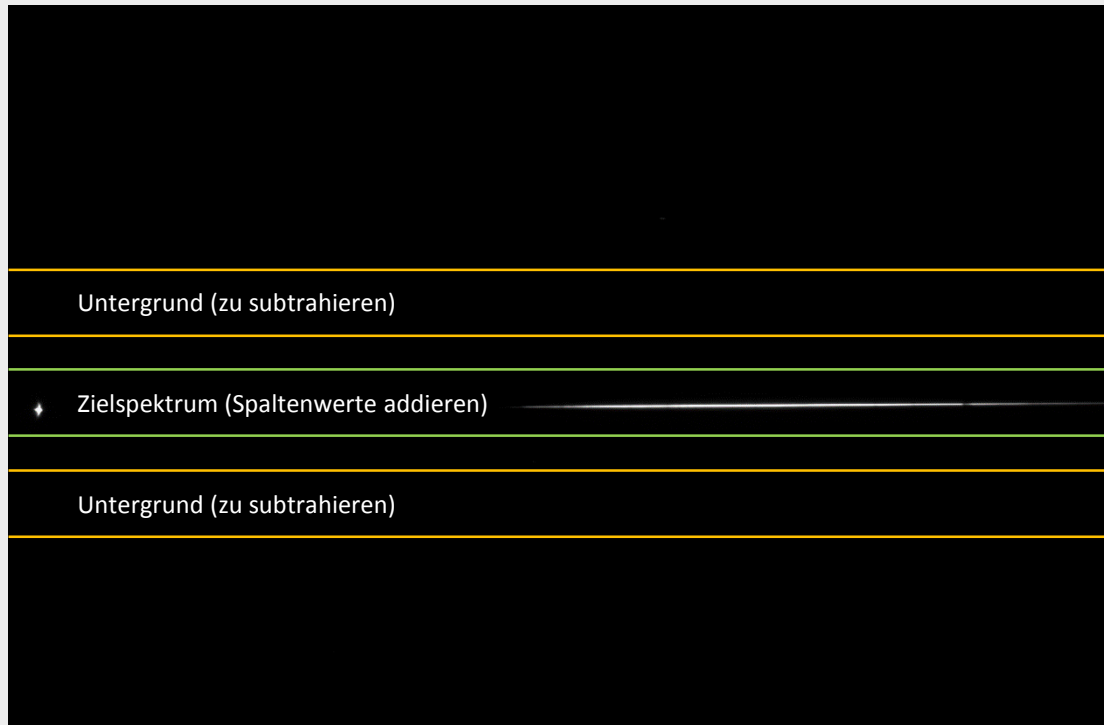
„2D-Spektrum“

Optik: ED72/432 mm

Kamera: ATIK 460EXm (12,5x10mm, 4,54µm Pixel)

Belichtung: 16 \* 0,5s

„1D-Spektrum“



# Wellenlängen-Kalibrierung am Beispiel von „RSpec“

Arcturus\_AT4B1No\_SA100\_Gi230421\_ED72\_432\_B1\_H49\_16m500ms\_AAM.fit

Angstroms/Pixel: 3.3184

Wavelength (Angstroms): 1.550E+06 to 0.000E+000

Pixel: 0 to 9500

Calibration Wizard - Linear

Order	Pixel	Wavelength	Residual
1	77.0000	0	0.003
2	1258.5000	3934	-0.177
3	1269.2000	3968.4939	-1.210
4	1292.1000	4045.8120	0.090
5	1346.5000	4226.7300	0.421
6	1371.2000	4307.7402	-0.542
7	1376.0000	4325.7622	1.551
8	1702.1000	5405.7749	0.249
9	1848.4000	5989.9502	-0.140
10	2367.0000	7605	-0.005
11	2639.0000	8498.0195	-4.722
12	2650.4000	8542.0898	1.748
13	2686.5000	8662.1396	2.745

RMS: 1.9327

Order: 2nd Order

Default: Load Factory Default

Buttons: Calculate, History, Apply default at Startup

Shift Points: Main Profile, Reference Profile

Elements:

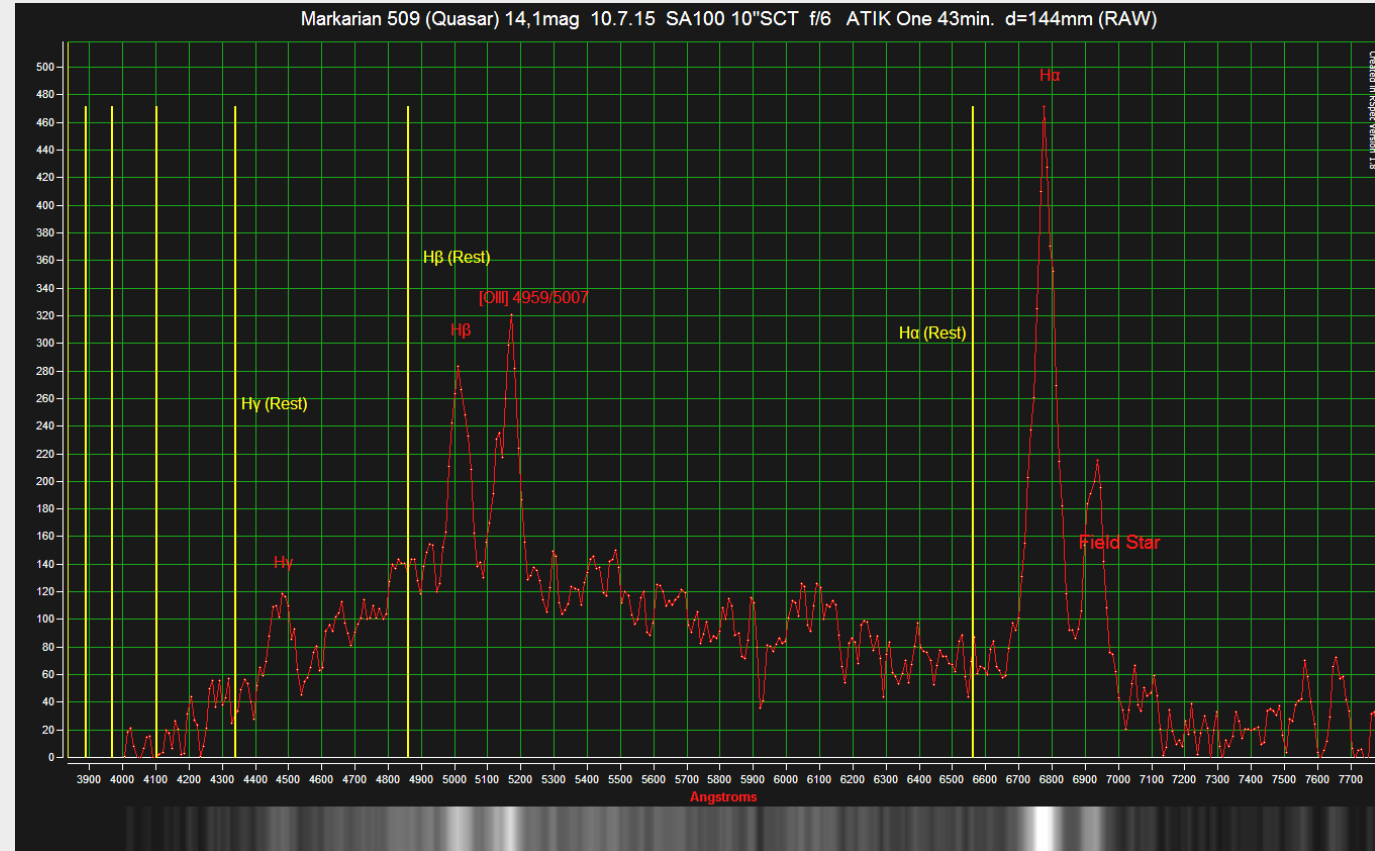
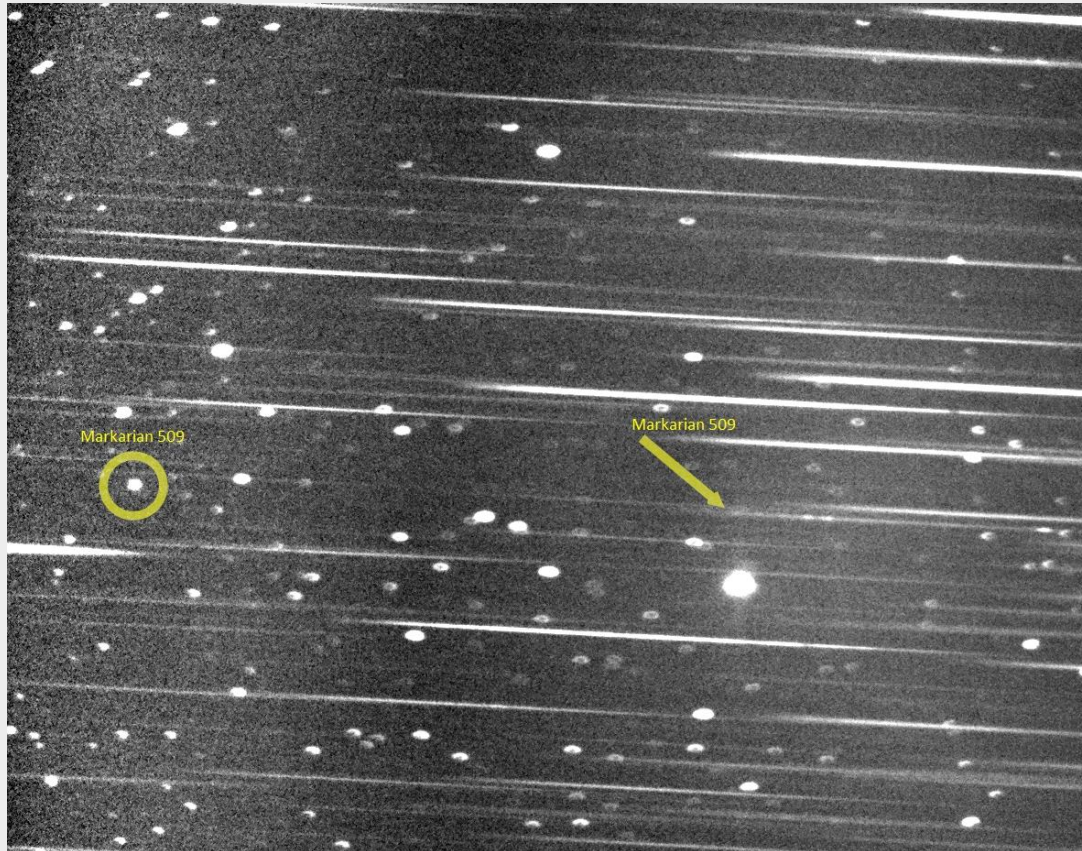
- Cr\_I\_NIST\_rel
- Cr\_II\_NIST\_rel
- Cr\_III
- DULUX\_Mini\_
- Eu\_II
- Eu\_III\_NIST\_rel
- Fe\_I\_NIST
- Fe\_I\_NIST\_rel
- Fe\_II\_NIST
- Fe\_III\_NIST
- Fe\_III
- Fraunhofer\_
- H2O
- He\_I
- He\_II
- Hg\_II\_NIST\_rel
- Hg\_I\_II
- Hg\_I\_NIST\_rel
- Hydrogen Balmer 'all'
- Hydrogen Paschen
- ISM
- K\_I
- K\_I\_NIST\_rel

Buttons: Select All, Unselect All, Close, Show Balmer Series

Edit: Spline Smoothing, Draw Continuum

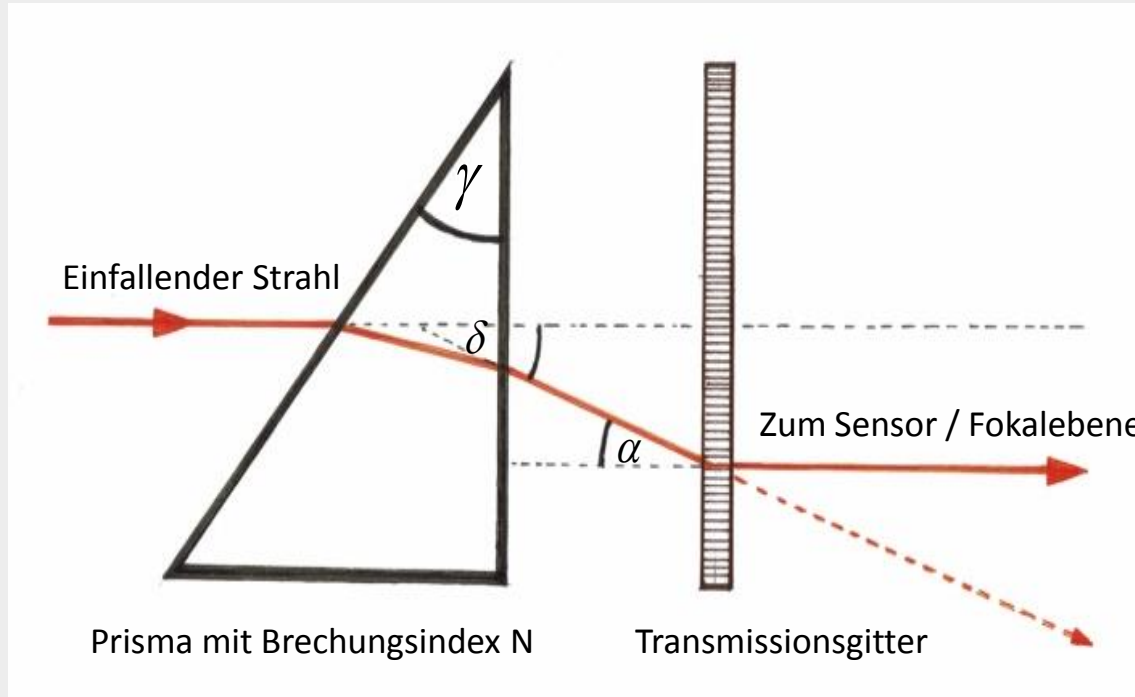


# Beispiel: Markarian 509 Quasar (Seyfert I AGN, $z = 0,035 \leftrightarrow v_{\text{Rad}} = 10500 \text{ km/s}$ )



Optik: Meade 10" SCT mit SA100 vor 0,6x Intes Fokalreduzierer ( $f = 1600 \text{ mm}$ )  
Kamera: ATIK One (12,5x10mm, 4,54 $\mu\text{m}$  Pixel)  
Belichtung: Insgesamt 2580 s

# Optimierung der Auflösung: Gitter und Einzelprisma („Grism“)



Vollständige Korrektur der spektralen Koma für eine bestimmte Wellenlänge:

$$\lambda_{corr} = \gamma \cdot g \cdot \frac{N^2 - 1}{N} \quad (\text{für 1. Ordnung})$$

Restliche spektrale Koma:

$$\Delta\lambda_{Coma} = \varepsilon \cdot \frac{3|\lambda - \lambda_{Corr}|}{8N^2}$$

(nach D. J. Schroeder, „Astronomical Optics“, 2. Aufl., S. 403)

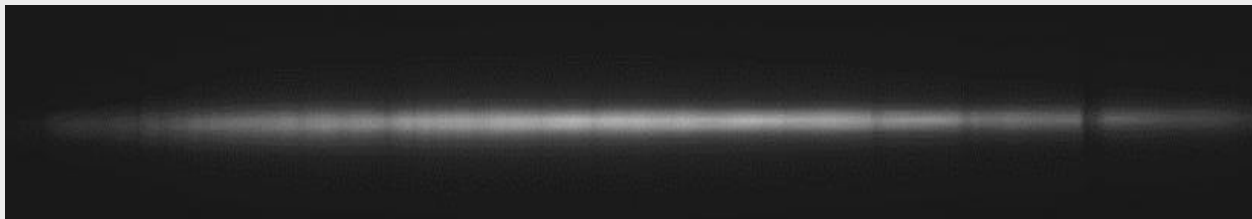
Beispiele:	Prisma & SA100	Prisma & SA200
Ablenkungswinkel Prisma $\delta$ (Hy)	2,0°	4,0°
Keilwinkel Prisma (BK7)	3,8°	7,6°
$\lambda_{corr}$ [Å]	5625	5625

## „Schönheitsfehler:“

- Astigmatismus (Verbreiterung des Spektralstreifens)
- Nichtlinearität des Ablenkungswinkels vergrößert
- 0. Ordnung nicht mehr gut zu verwenden

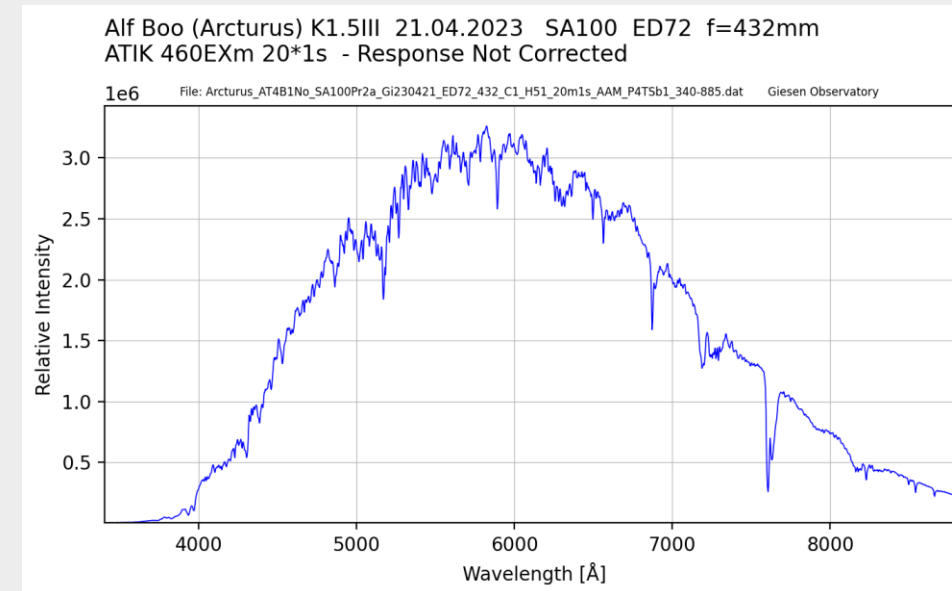
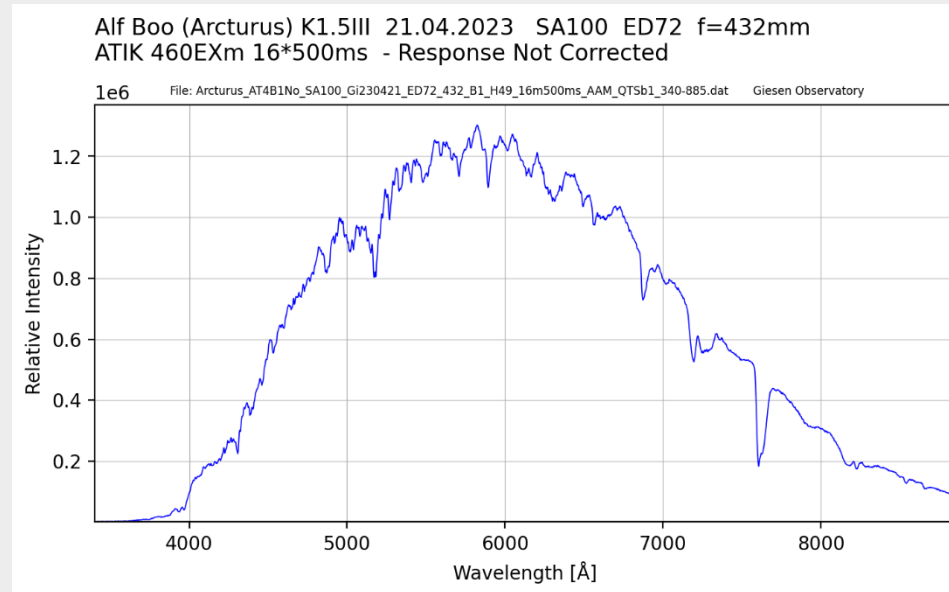
SA100 ohne Prisma

$$\Delta\lambda \approx 14 \text{ \AA}$$

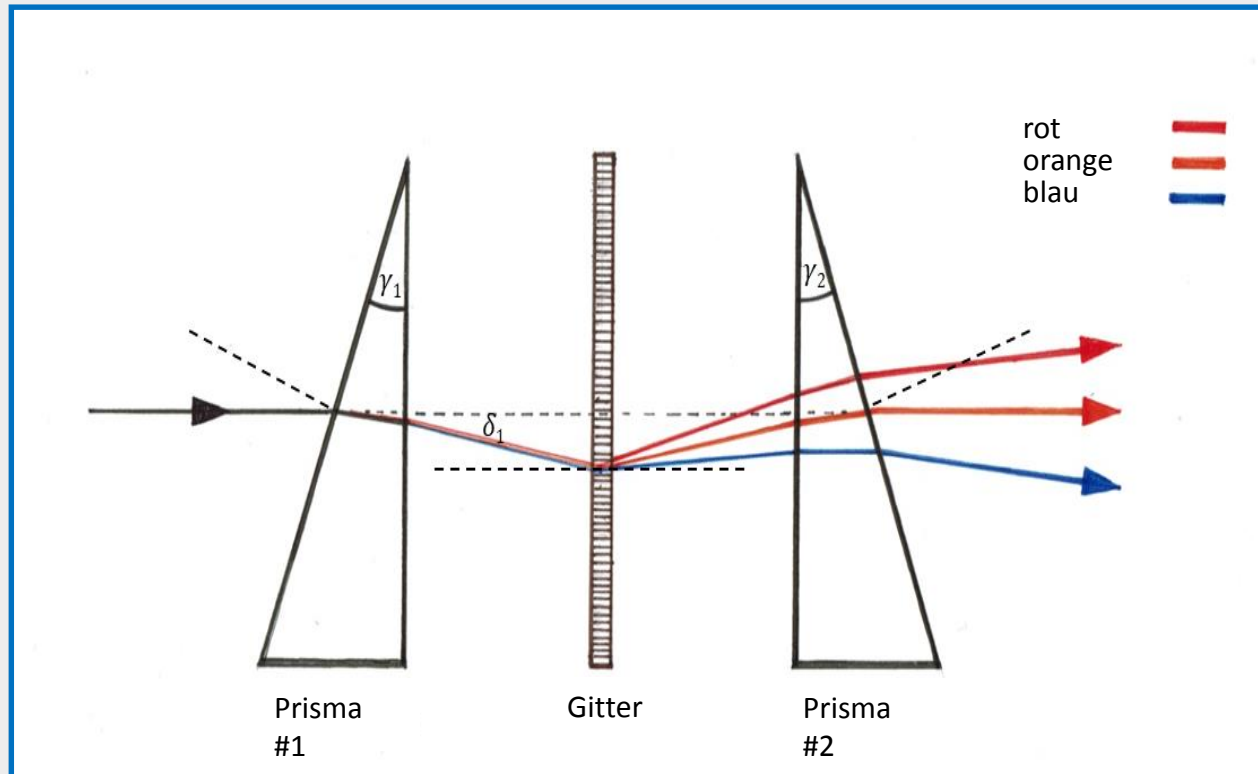


SA100 mit 2° Prisma

$$\Delta\lambda \approx 7 \text{ \AA}$$



# „Finale Optimierung:“ 2 Prismen sowie Abstimmung Optik & Sensorabstand



Beispiel: ED102/714, SA200,  $d = 150 \text{ mm}$ ,  $\Delta S'' = 4''$

$$\rightarrow \Delta S_{\text{\AA}} = 4,6 \text{ \AA}$$

→ **Weitgehende Korrektur von Koma und Astigmatismus!**

Absolute Auflösung in  $\text{\AA}$  ist nun gegeben durch:

$$\Delta S_{\text{\AA}} = 48.48 \Delta S'' \frac{F_{mm}}{d_{mm} \cdot L_{mm}}$$

$F_{mm}$ : Brennweite in mm

$d_{mm}$ : Abstand Gitter  $\leftrightarrow$  Sensor in mm

$L_{mm}$ : Gitter Linien / mm

$\Delta S''$ : Abbildung des Sterns in Bogensekunden

$$(\Delta S'')^2_{total} = (\Delta S'')^2_{Airy} + (\Delta S'')^2_{Seeing} + (\Delta S'')^2_{Guiding} + \dots$$

# „Finale Optimierung:“ 2 Prismen und Abstimmung Optik / Sensorabstand

Die gesamte Strategie zur Optimierung kann hieraus abgeleitet werden:

- ✓ Brennweite möglichst klein
- ✓ Abstand Gitter<-> Sensor möglichst groß
- ✓ (evtl.) Gitter höherer Dispersion verwenden
- ✓ Sternabbild möglichst klein (große Apertur, APO etc.)

Allerdings weitere Randbedingungen zu beachten:

- ✓ Kein „Undersampling“ (Pixelmaßstab angemessen)
- ✓ Abzudeckender Spektralbereich etc.

Beispiel: ED102/714, SA200,  $d = 150$  mm,  $\Delta S'' = 4''$

$$\rightarrow \Delta S_{\text{\AA}} = 4,6 \text{ \AA}$$

➔ **Weitgehende Korrektur der Koma und des Astigmatismus!**

Absolute Auflösung in  $\text{\AA}$  ist nun gegeben durch:

$$\Delta S_{\text{\AA}} = 48.48 \Delta S'' \frac{F_{mm}}{d_{mm} \cdot L_{mm}}$$

$F_{mm}$ : Brennweite in mm

$d_{mm}$ : Abstand Gitter <-> Sensor in mm

$L_{mm}$ : Gitter Linien / mm

$\Delta S''$ : Abbildung des Sterns in Bogensekunden

$$(\Delta S'')^2_{total} = (\Delta S'')^2_{Airy} + (\Delta S'')^2_{Seeing} + (\Delta S'')^2_{Guiding} + \dots$$



# Verwendete Gitter-Prismen Kombinationen (Grisms)

## a) Für den Einsatz an Refraktoren:

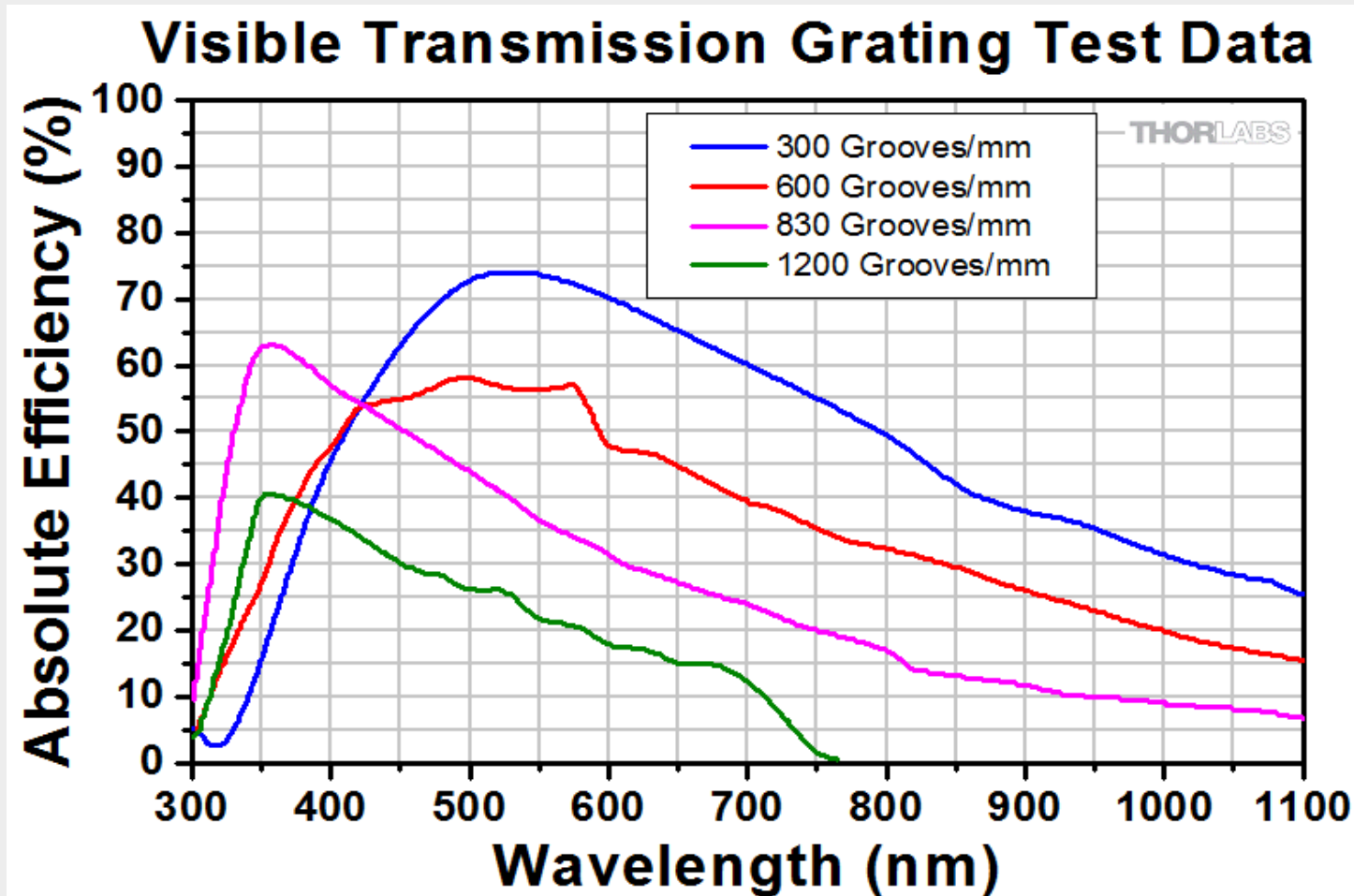
- SA200 mit 2 \* 2° Prismen (Gitter  $\varnothing$  23,5 mm)
- „BA207“ -- “” -- (altes Baader-Gitter  $\varnothing$  26 mm, 207 L/mm)

## b) Bei Schmidt-Cassegrain Optiken zusätzlich:

- SA100 (ohne Prismen,  $\varnothing$  23,5 mm)
- „EA300“ 2 \* 4° Prismen (Edmund Optics-Gitter 1"  $\square$  300 L/mm)
- „TA300“ 2 \* 4° Prismen (Thorlabs-Gitter 1"  $\square$  300 L/mm)
- „TA300i“ 2 \* 6° Prismen (dito, für IR-Bereich)
- „TA600“ 2 \* 10° Prismen
- („TA830“ 2 \* 12° (2 \* 14°) Prismen)



# „Visuelle“ Thorlabs-Gitter: Effizienzkurven



Quelle: Thorlabs Inc.

# Verwendete Optiken für den konvergenten Strahlengang

Refraktor	F [mm]	F / D	Bemerkung
TS ED 60	330	5,5	Sehr kompakt, aber Undersampling mit vorhandenen Sensoren
TS Photoline ED72	432	6,0	Gute Abbildung, leichtes Undersampling, Schwächen im UV
Skywatcher Eqinox ED80	500	6,25	Sehr gute Abbildung, Schwächen im UV
TS Photoline ED102	712	7,0	„Perfekte Abbildung“ über gesamten Bereich UV-IR
Skywatcher ED 120	900	7,5	Sehr gute Abbildung (bis auf UV), benutzt für höhere Dispersion
Skywatcher FH 100	500	5,0	Gute Abbildung, aber Wellenlängenbereich eingeschränkt

Schmidt-Cassegrain	F <sub>nom</sub> [mm]	F <sub>nom</sub> / D	F <sub>reduziert</sub> [mm]	Bemerkung
Celestron C8	2032	10	ca. 1100-1200	Einsatz mit 0,6x bzw 0,63x Reduzierer
Meade LX200 10"	2540	10	ca. 1300-1600	dito / EMC – Vergütung
Celestron C14	3910	11	ca. 2000-2300	dito / XLT – Vergütung

# Verwendete Kameras

Kamera	Sensor	B x H [mm]	Pixelzahl	Pixel [µm]	Bemerkung
Meade DSI3	Sony IXC285AL	8,8 x 6,6	1360 x 1024	6,45	Ohne Kühlung
ZWO ASI	Sony IMX178	7,4 x 5,0	3096 x 2080	2,4	CMOS (hochfrequente „Fringes“)
ATIK 460EXm	Sony IXC694	12,5 x 10	2749 x 2199	4,54	Sehr empfindlich und rauscharm
ATIK One	Sony IXC694	12,5 x 10	2749 x 2199	4,54	Wie 460EXm, mit Filterrad und stärkerer Kühlung
ATIK 383L+	Kodak KAF-8300	18,0 x 13,6	3354 x 2529	5,4	Relativ starker Untergrund („Hot Pixel“ und „Cosmics“)

# Adaption Kamera + Grism an jeweilige Optik

Einsatz ohne Reduzierer  
(an Refraktoren)



jew. Grism

1,25"-Verlängerungen

2"- Steckhülse

Fokal-Reduzierer

T2-Verlängerungen

Kamera (hier: ATIK One)

Einsatz mit Reduzierer (an SCTs)





# Typische „Grism“ - Konfigurationen

a ) Refraktor ED102/714  $f = 714 \text{ mm}$

Gitter (L/mm)	Prismen (Ablenkungswinkel)	Keine Ablenkung bei	Rest-Astigmatismus (Höhe Spektralstreifen, FWTM)	Distanz Gitter <-> Sensor	Dispersion (für ATIK One, 4.54 $\mu\text{m}$ Pixel)	$\lambda$ - Bereich (für ATIK One)	Typische Auflösung (3" Seeing)
200	$2^\circ + 2^\circ$	3491 $\text{\AA}$	$\approx 14''$	150 mm	1,45 $\text{\AA}/\text{pix}$	3980 $\text{\AA}$	4 $\text{\AA}$

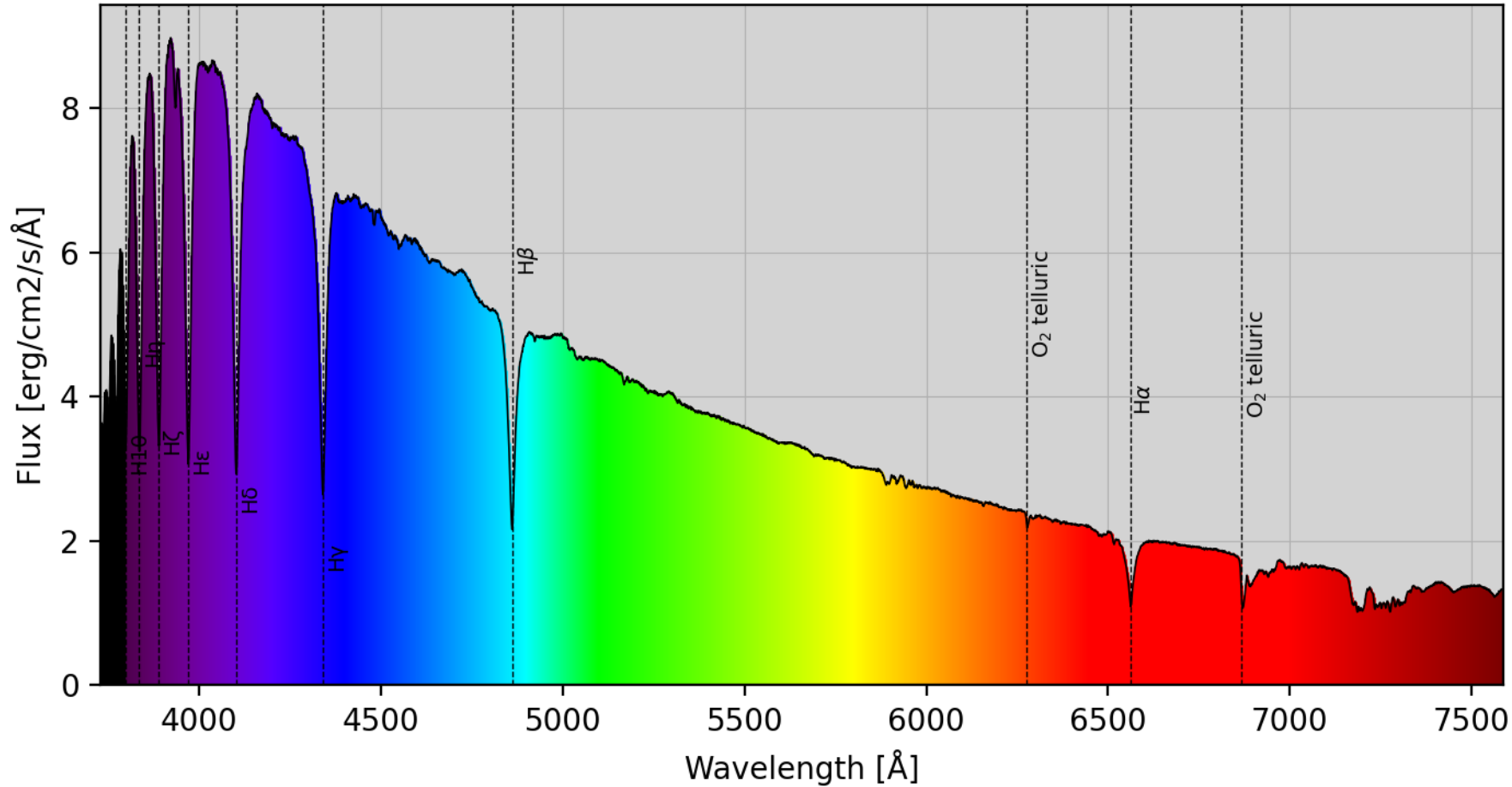
b) Schmidt-Cassegrain Meade 10" f/10, mit Reduzierer (hier:  $f = 1300 \text{ mm}$ )

200	$2^\circ + 2^\circ$	3491 $\text{\AA}$	15"	(194 mm)	1.28 $\text{\AA}/\text{pix}$	3520 $\text{\AA}$	6 $\text{\AA}$
300	$4^\circ + 4^\circ$	4654 $\text{\AA}$	18"	(175 mm)	1.01 $\text{\AA}/\text{pix}$	2775 $\text{\AA}$	4,5 $\text{\AA}$
600	$10^\circ + 10^\circ$	5818 $\text{\AA}$	16"	(180 mm)	0.48 $\text{\AA}/\text{pix}$	1320 $\text{\AA}$	2,5 $\text{\AA}$

- 200er und 300er Gitter gut geeignet für Übersichtsspektren (mit ATIK 460EX bzw. 383L+)
- Nachteil: Durch zu klein dimensionierte Gitter und Prismen z.T. sehr starke Vignettierung mit Reduzierer
- Vorteil: Unterdrückung der 0. Ordnungen mit zunehmender Dispersion

Alf Lyr (Vega) A0Va 11.11.2020 Grism207 ED102 f=714mm  
ATIK One 15\*1s - Absolute Flux

1e-9 File: Vega\_ATB1No\_BA207Pr2b2a\_Gi201111\_ED102\_714\_B2\_H29K5\_15m1s\_P4TSb1d\_373-764f.dat Giesen Observatory



*Konfiguration:*

BA207, Prismen: 2\*2°

ED102 f = 712 mm

d<sub>Gitter-Sensor</sub> : 150 mm

ATIK One

Dispersion: 1,43 Å/pix

Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 4,6 \text{ \AA}$

*Objekt:*

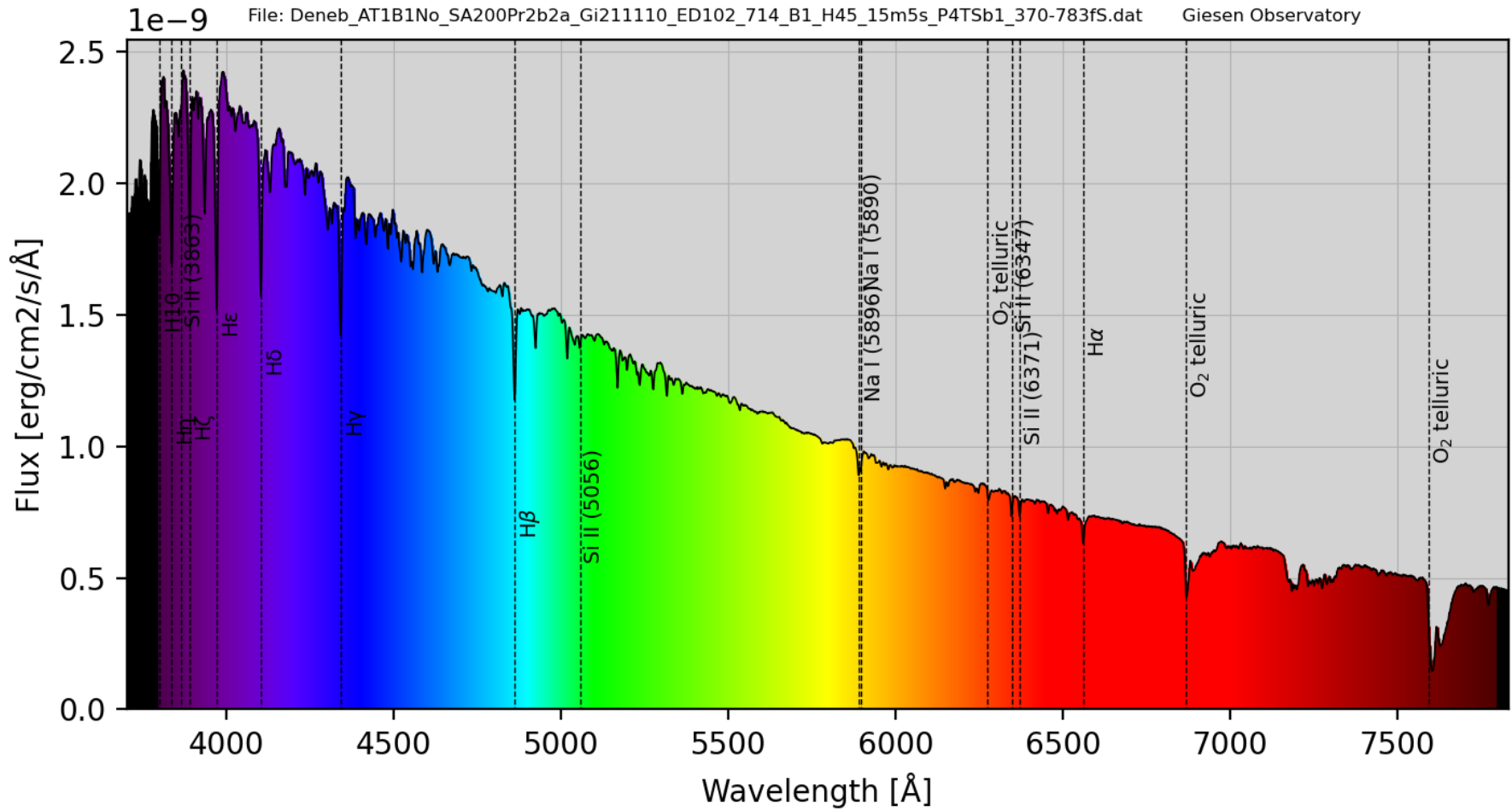
Vega ( $\alpha$  Lyr)

Spektraltyp: A0Va

m<sub>vis</sub> : 0,03 mag

(Calspec-Standardstern)

Alf Cyg (Deneb) A2Ia 10.11.2021 Grism200 ED102 f=714mm  
ATIK One 15\*5s - Absolute Flux



*Konfiguration:*

SA200, Prismen: 2\*2°

ED102 f = 712 mm

d<sub>Gitter-Sensor</sub> : 145 mm

ATIK One

Dispersion: 1,51 Å/pix

Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 4,5 \text{ \AA}$

*Objekt:*

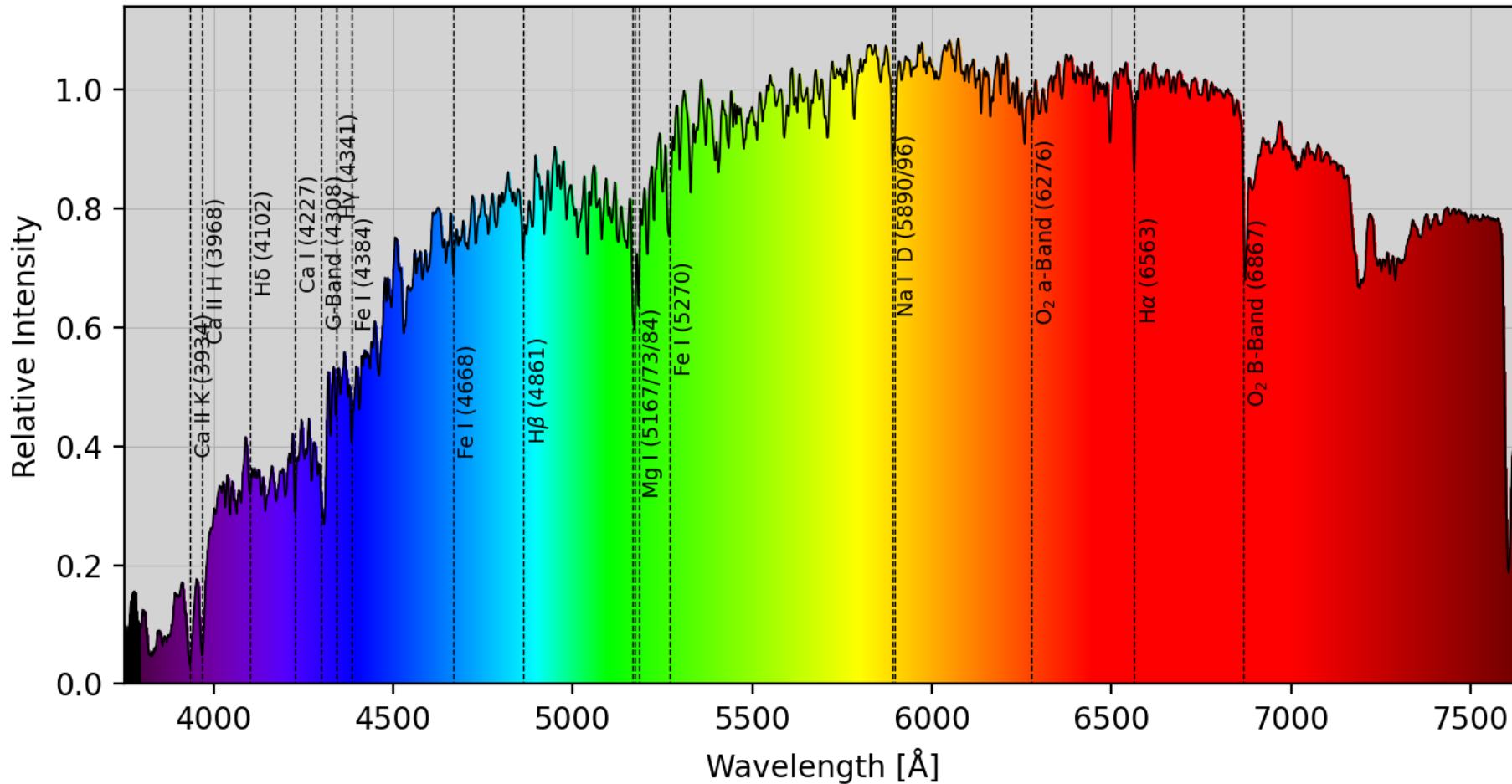
Deneb (α Cyg)

Spektraltyp: A2Ia

m<sub>vis</sub> : 1,25 mag

Alf Boo (Arcturus) K1.5III 09.04.2023 Grism300 C14 f=2270mm  
ATIK 383L+ 11\*500ms - Response Corrected

File: Arcturus\_AT3B1No\_EA300Pr4a4b\_Gi230409\_C14\_2270M\_D3\_H50\_11m500ms\_P4TSb1\_375-764cus.dat Giesen Observatory



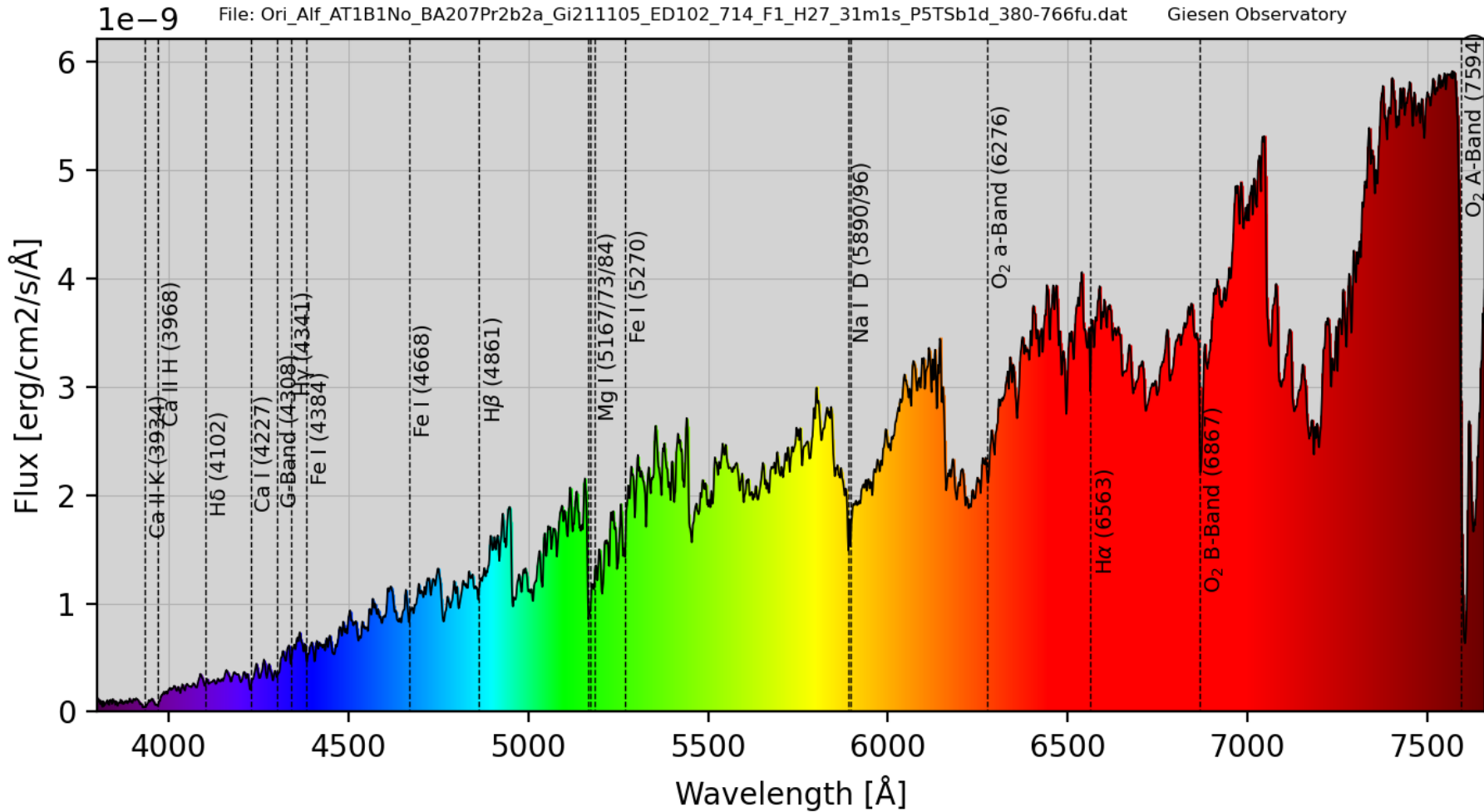
*Konfiguration:*

EA300, Prismen: 2\*4°  
C14 f = 2270 mm (!)  
ATIK 383L+  
Dispersion: 1,22 Å/pix  
Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 5 \text{ \AA}$

*Objekt:*

Arktur ( $\alpha$  Boo)  
Spektraltyp: K1.5III  
 $m_{\text{vis}}$  : -0,05 mag

Alf Ori (Betelgeuse) M1-M2Ia-ab 05.11.2021 Grism207 ED102 f=714mm  
 ATIK One 31\*1s - Absolute Flux



*Konfiguration:*

BA207, Prismen: 2\*2°

ED102 f = 712 mm

d<sub>Gitter-Sensor</sub> : 151 mm

ATIK One

Dispersion: 1,42 Å/pix

Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 4 \text{ \AA}$

*Objekt:*

Beteigeuze (α Ori)

Spektraltyp: M1-M2Ia-ab

m<sub>vis</sub> : 0,42 mag (var)

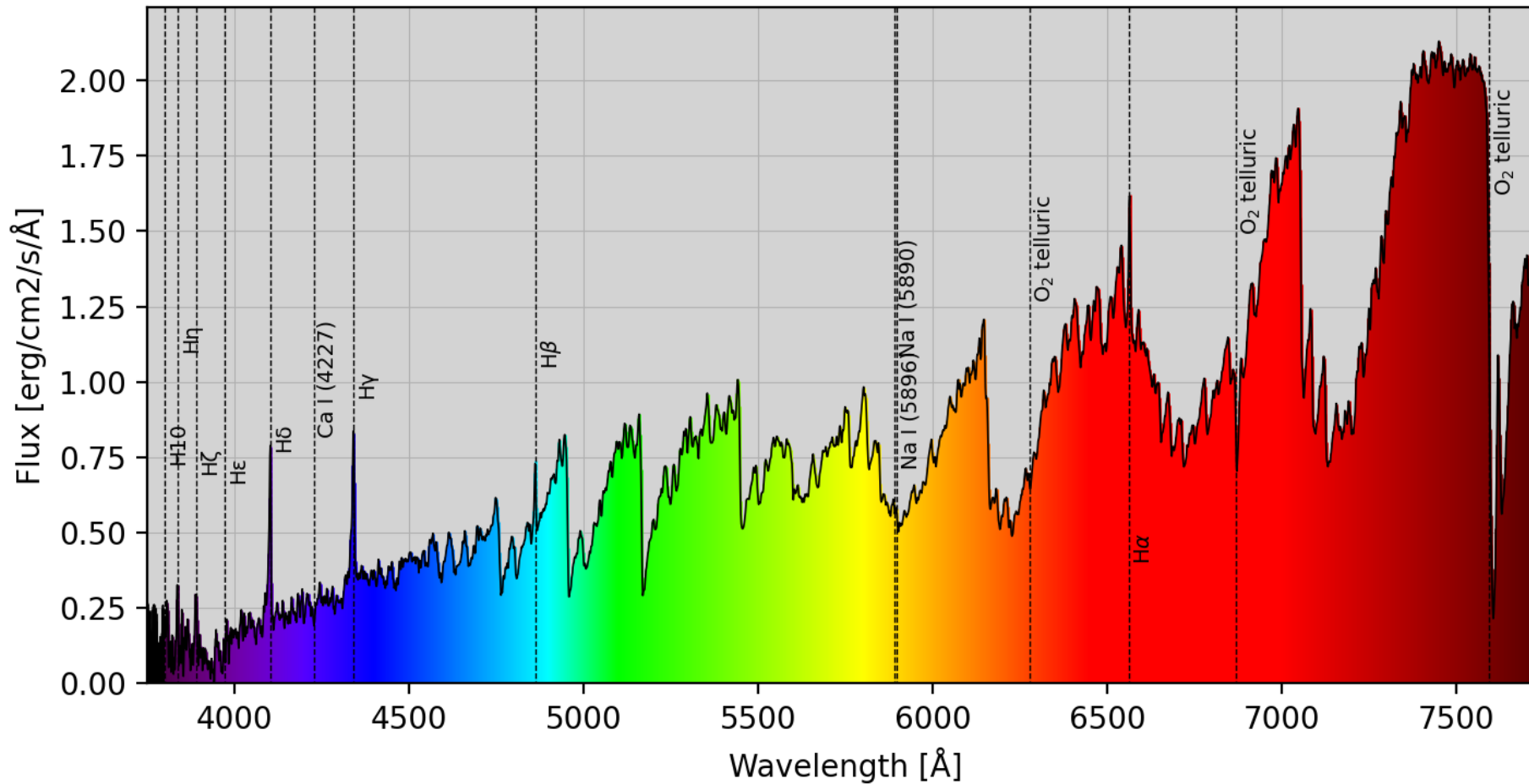


# Kalibrierung: Wellenlängeneichung und Ansprechfunktion

- Zuordnung Spaltenwerte (x-Koordinaten) zu bekannten Wellenlängen
  - anhand stellarer Linie (relativ)
  - anhand atmosphärischer Linien (absolut)
- Ermittlung Ansprechkurve durch Messung eines Referenzsterns in gleicher Höhe
  - Referenzstern mit bekanntem Spektraltyp (Spektralbibliotheken: „Miles“, „Pickles“,..)
  - Anwendung dieser Ansprechkurve auf Zielsternspektrum
  - Für „photometrische“ Nächte und absolute Ansprechkurve („Calspec“-Sterne) auch absolute Flusskalibrierung der Spektren möglich, ansonsten nur relative Intensitäten

R Vir M3.5-7e 28.04.2022 Grism207 ED102 f=714mm  
ATIK 383L+ 15\*60s - Absolute Flux

1e-11 File: Vir\_R\_AT3B1No\_BA207Pr2b2a\_Gi220428\_ED102\_714\_F1g\_H42\_15m60s\_P4TSb2\_375-775fu.dat Giesen Observatory



*Konfiguration:*

BA207, Prismen: 2\*2°

ED102 f = 712 mm

( $D_{\text{eff}}$ : 88 mm)

$d_{\text{Gitter-Sensor}}$  : 203 mm

ATIK 383L+

Dispersion: 1,30  $\text{\AA}/\text{pix}$

Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 5 \text{\AA}$

*Objekt:*

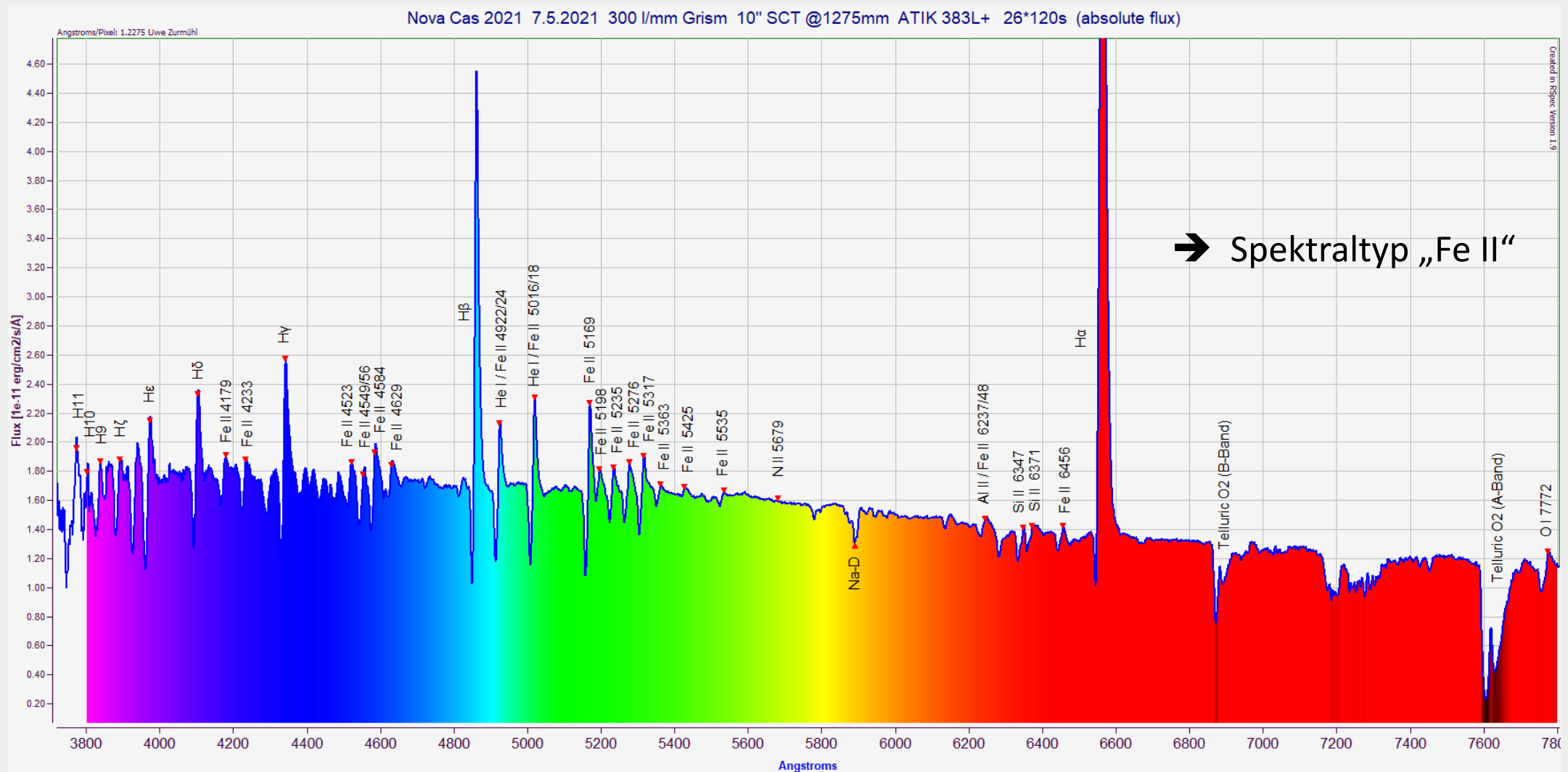
R Vir (Mira-Variable)

Spektraltyp: ca. M3.5III

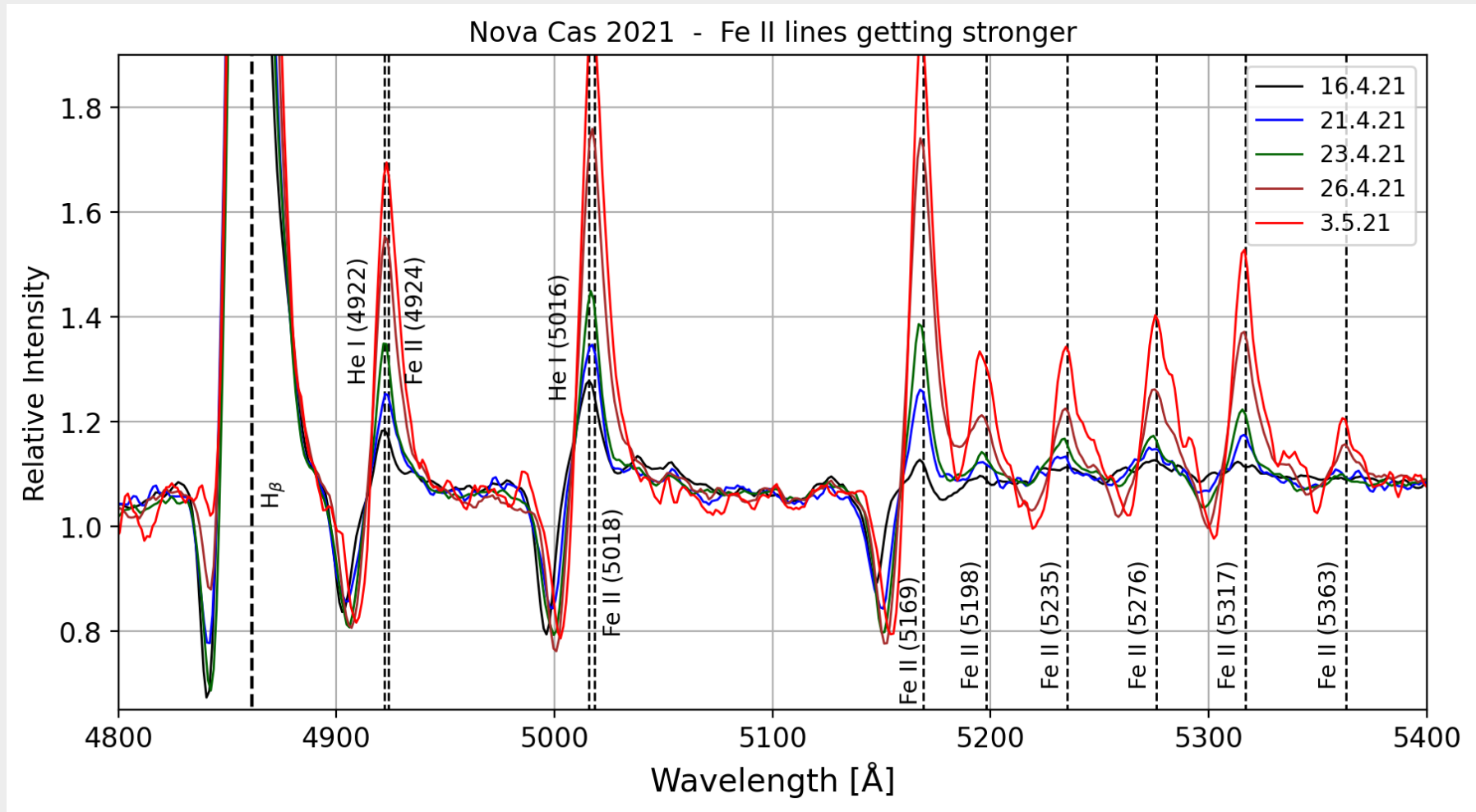
(M3.5-7e)

$m_{\text{vis}}$  : 6,8 mag (6 - 12)

# Nova Cas 2021 (V1405 Cas), entdeckt am 18.3.2021



# Nova Cas 2021 (V1405 Cas) Entwicklung FeII-Linien



*Konfiguration:*

EA300, Prismen: 2\*4°

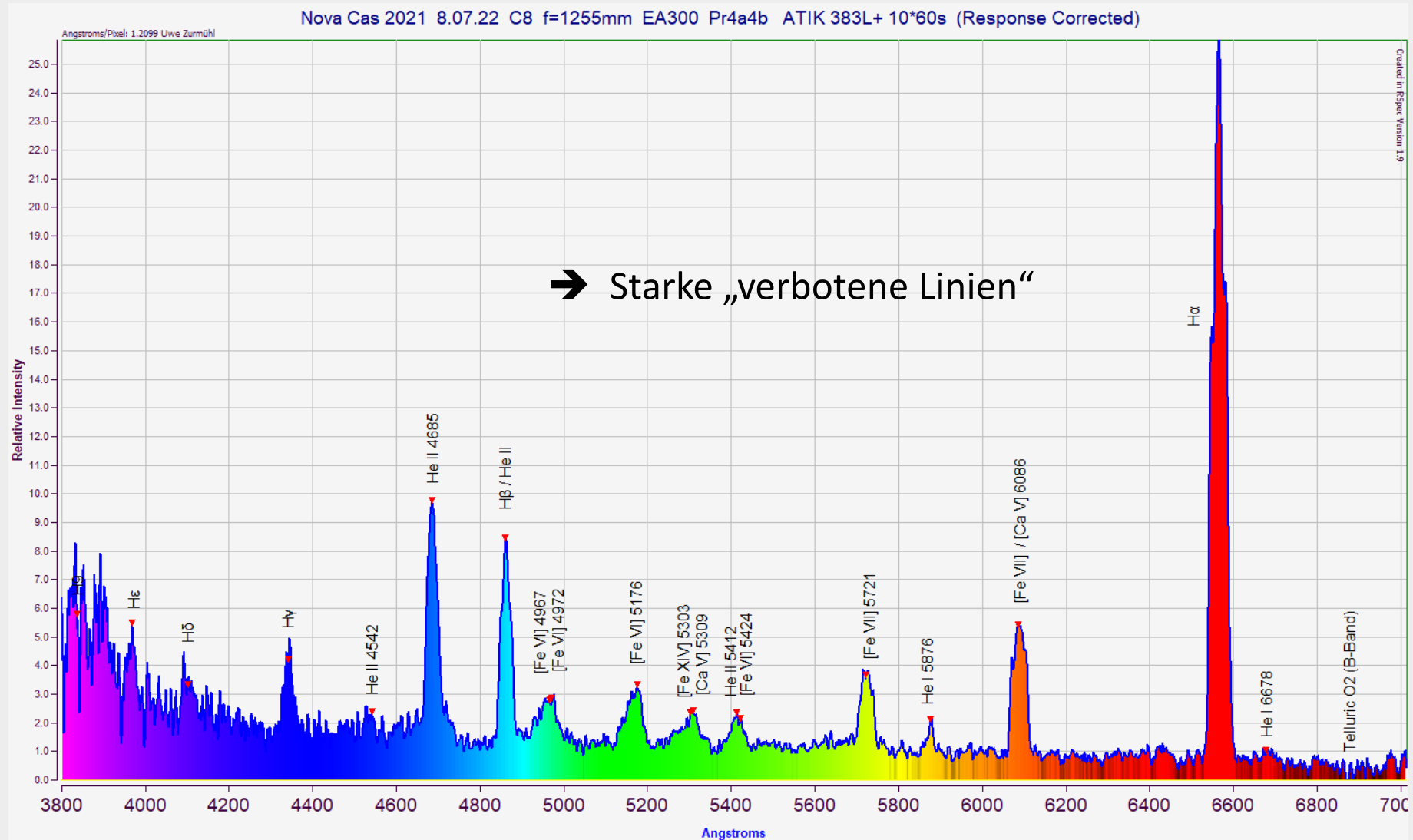
10" SCT  $f \approx 1355$  mm

ATIK 383L+

Dispersion:  $\approx 1,3 \text{ \AA/pix}$

Abs. Aufl.:  $\Delta\lambda \approx 5 \text{ \AA}$

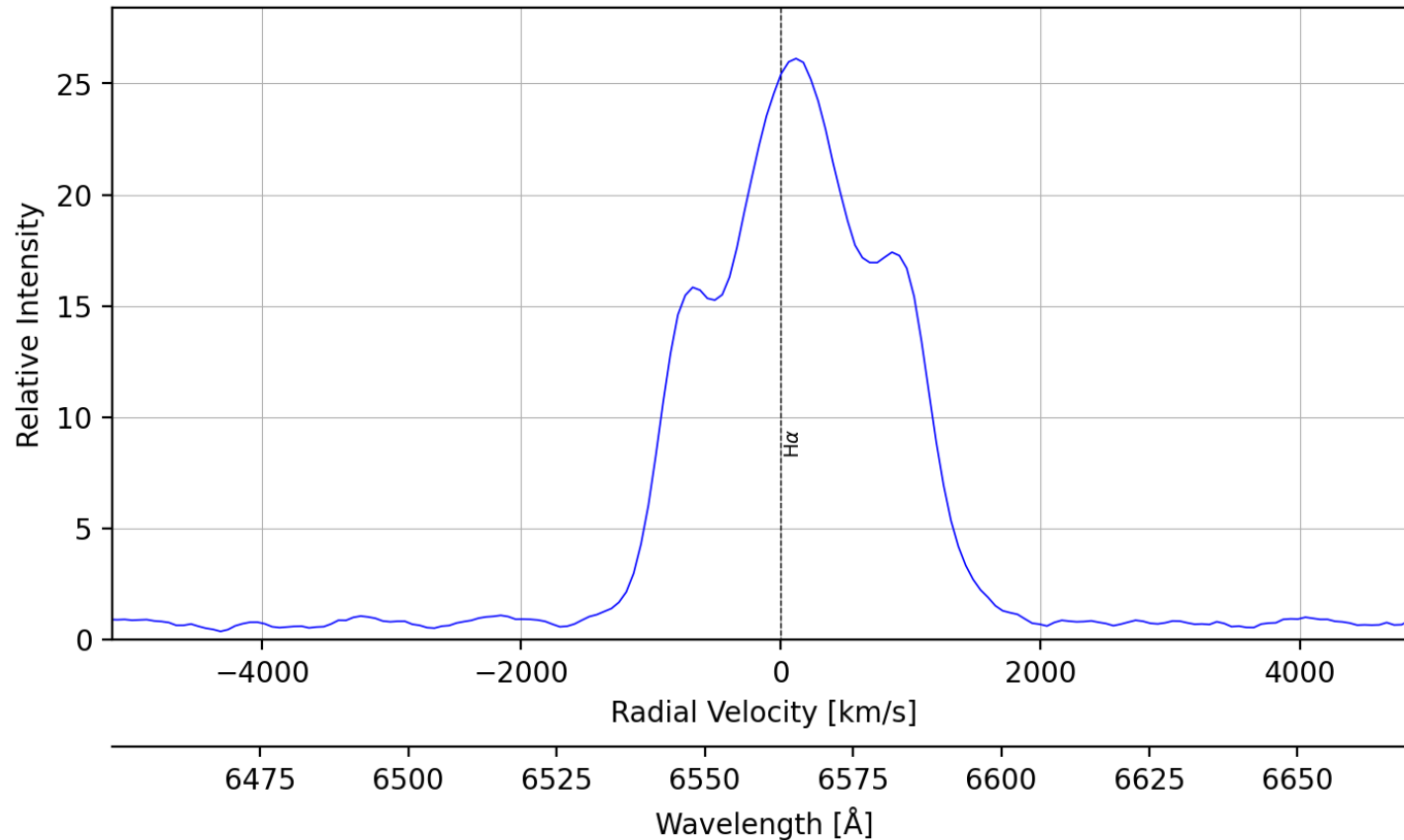
# Nova Cas 2021 (V1405 Cas) am 8.7.2022



# Nova Cas 2021 (V1405 Cas) am 8.7.2022

V1405 Cas 08.07.2022 Grism300 C8 f=1255mm  
ATIK 383L+ 10\*60s - Response Corrected

File: Cas\_V1405\_AT3B1No\_EA300Pr4a4b\_Gi220708\_C8\_1255M\_E1g\_H52\_10m60s\_P4TSb4d\_370-701cus.dat Giesen Observatory



Doppler-Effekt (nichtrelativistisch):

$$v_{\text{radial}} = (\Delta\lambda / \lambda) * c$$

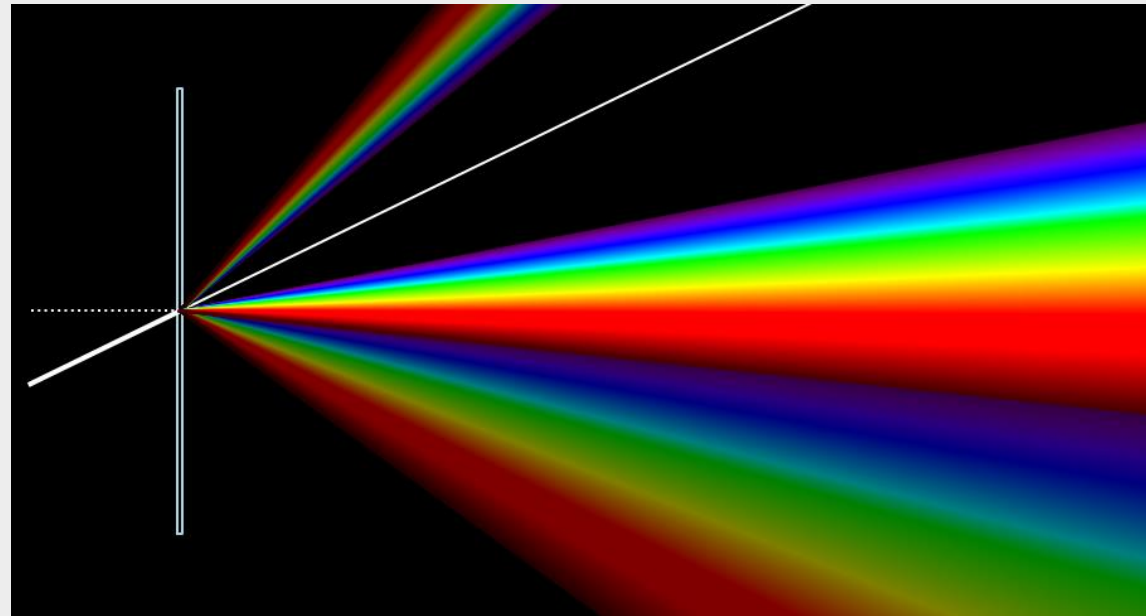
➔ Geschwindigkeit der Explosionswolke ca. 1800 km/s



# Literaturhinweise (Gitter im konvergenten Strahlengang)

- (1) Doug West, *Resolution Calculation for a Slitless Spectrograph*  
<http://users.erols.com/njastro/faas/articles/west01.htm>
- (2) Christian Buil, *A low cost spectrograph, diffractive grating in the converging optical beam*  
<http://www.astrosurf.com/buil/us/spe1/spectro1.htm>
- (3) Erik Wischnewski, *Spektrale Auflösung mit dem StarAnalyser*  
[http://www.astronomie-buch.de/Astronomical\\_Bulletin\\_Nr\\_16.pdf](http://www.astronomie-buch.de/Astronomical_Bulletin_Nr_16.pdf) , 2014
- (4) Uwe Zurmühl, Spektrum Nr. 51, 2/2016, *Transmission Gratings – Resolution Optimization for Convergent Beam Setups*  
<http://spektroskopie.fg-vds.de/pdf/Spektrum51.pdf>
- (5) Robin Leadbeater - Homepage  
<http://www.threehillsobservatory.co.uk/astro/astro.htm>
- (6) Paton Hawksley Education Ltd.  
<https://www.patonhawksley.com/astronomy-1>
- (7) Daniel J. Schroeder, “Astronomical Optics”, 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press 2000

## II) Hochauflösende Spektroskopie mit dem Objektivgitter



# Objektivgitterspektroskopie

Selten benutzte Technik, nur wenige Beispiele für professionellen Einsatz:

- Drahtgitter vor Apertur eines 71cm-Reflektors (M. Wolf 1921), grobe Spektralklassifikation
- Transmissionsgitter-Mosaik vor 18“ Schmidt-Teleskop (F. Zwicky, 1940)

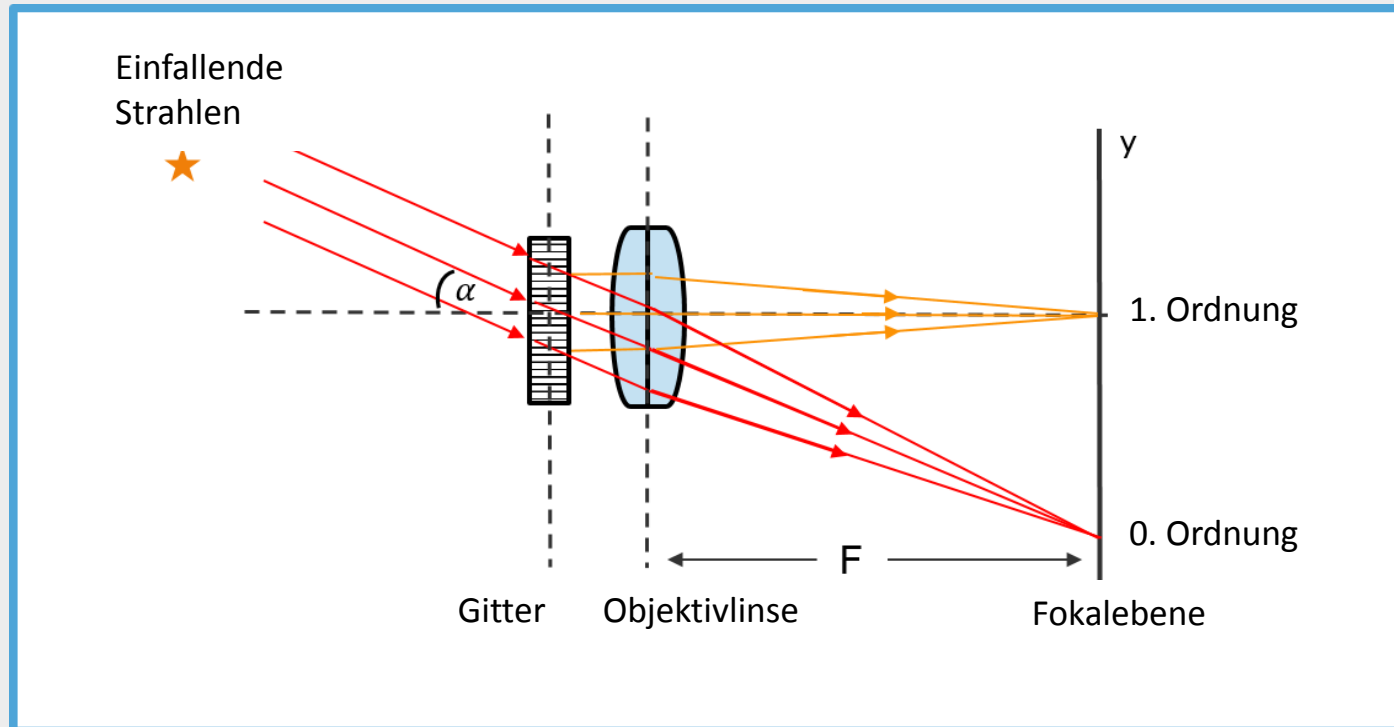
Im Amateurbereich:

- Gitter aus Angelschnüren vor Celestron 8 (M. Köbberling, SuW 6/1998)
- Kleine Transmissionsgitter (Foliengitter, SA100 etc.) vor Objektiv- / Teleskop-Apertur (z.B. für Meteoritenspektroskopie)

➔ Viele Gemeinsamkeiten mit Objektiv*prismen*-Spektroskopie

# Strahlengang für Objektivgitter-Spektroskopie (in 1. Ordnung)

Hier: Gitter senkrecht zur optischen Achse



Unterschiede zum konvergenten Strahlengang:

- Parallel einfallende Strahlen
- Wesentlich höhere Dispersion / Auflösung
- Geringerer Wellenlängenbereich
- Großer Einfallswinkel zur optischen Achse
- Apertur begrenzt durch Gittergröße
- Höhere Anforderungen an optische Qualität des Gitters

Gitter	200 L/mm	300 L/mm	600 L/mm	830 L/mm	1200 L/mm
Einfallswinkel $\alpha$ bei 5500 Å	6,32°	9,50°	19,30°	27,16°	41,30°

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{g}$$

# Auflösung für Objektivgitter (in 1. Ordnung)

**Absolute Auflösung in Å:**

$$\Delta S_{\text{Å}} = 48,48 \cdot \frac{\Delta S_y''}{L_{\text{mm}}}$$

$L_{\text{mm}}$ : Gitter Linien / mm

$\Delta S_y''$ : Unschärfe der Abbildung in Bogensekunden (in Dispersionsrichtung)

$$(\Delta S_y'')^2 = (\Delta S_y'')_{\text{Beugung}}^2 + (\Delta S_y'')_{\text{Seeing}}^2 + (\Delta S_y'')_{\text{Guiding}}^2 + \dots$$

**Relative Auflösung:**  $R = \lambda / \Delta\lambda = \lambda_{\text{Å}} / \Delta S_{\text{Å}}$

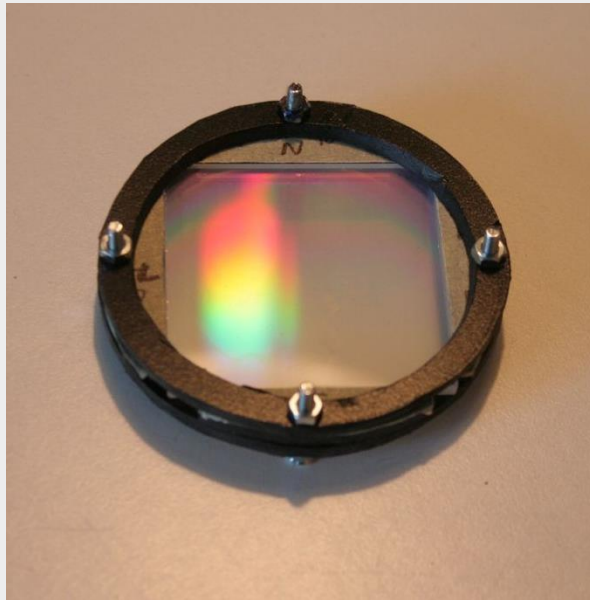
**→ Auflösung hängt nur ab von Abbildungsschärfe und Gitter!**

Rechenbeispiele für ein Seeing von 3" und Beugung an Apertur (bei 5500 Å):

$\Delta S_{\text{Å}}$ für Gitter	100 L/mm	200 L/mm	300 L/mm	325,5 L/mm	600 L/mm	830 L/mm	1200 L/mm
∅ 25 mm	3,04 Å	1,52 Å	0,89 Å				
□ 50 mm		0,92 Å	0,61 Å		0,31 Å	0,23 Å	0,17 Å
□ 65 mm			0,56 Å	0,52 Å	0,29 Å		

# Verwendete Objektivgitter

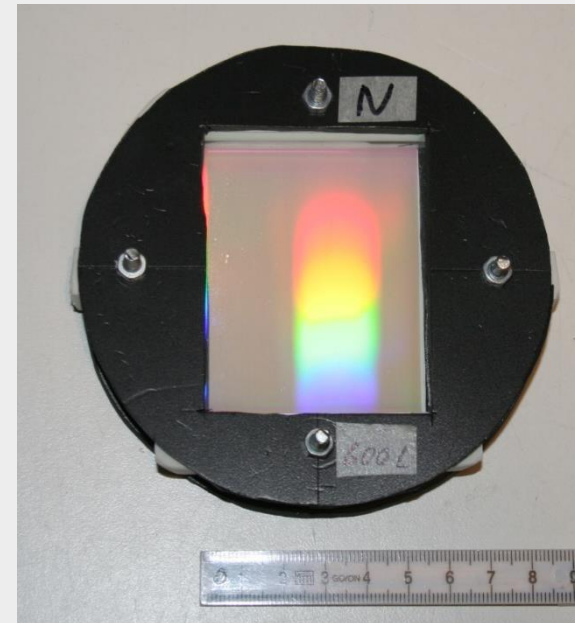
I ) Abmessungen: 5 cm x 5 cm



Hersteller:  
Paton Hawksley (200 L/mm)  
Thorlabs (restliche)

Strichzahl:  
200 L/mm  
300 L/mm  
600 L/mm  
830 L/mm  
1200 L/mm

II) Abmessungen: 6,5 cm x 6,5 cm (ca.)



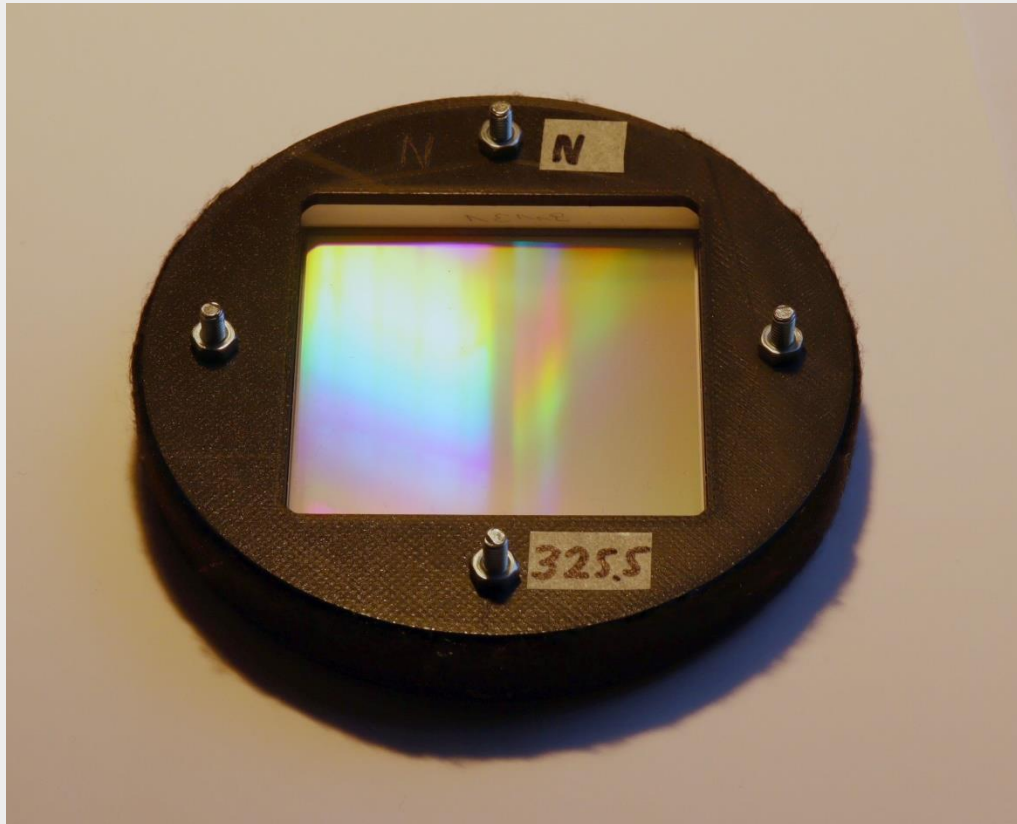
Hersteller:  
ZEISS

Strichzahl:  
300 L/mm  
325,5 L/mm  
600 L/mm

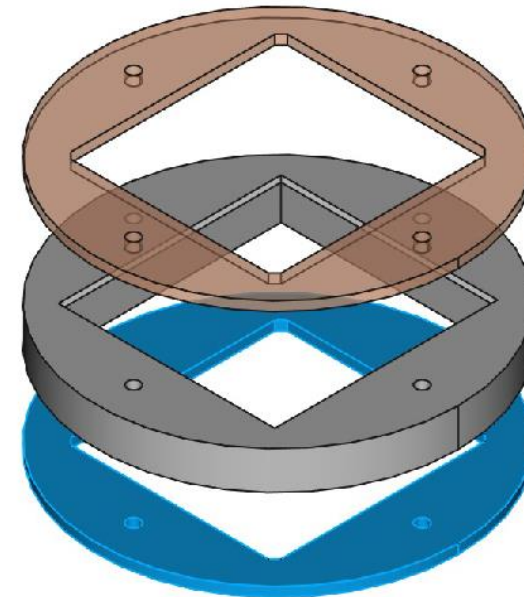


# ZEISS Transmissionsgitter mit 325,5 Linien/mm

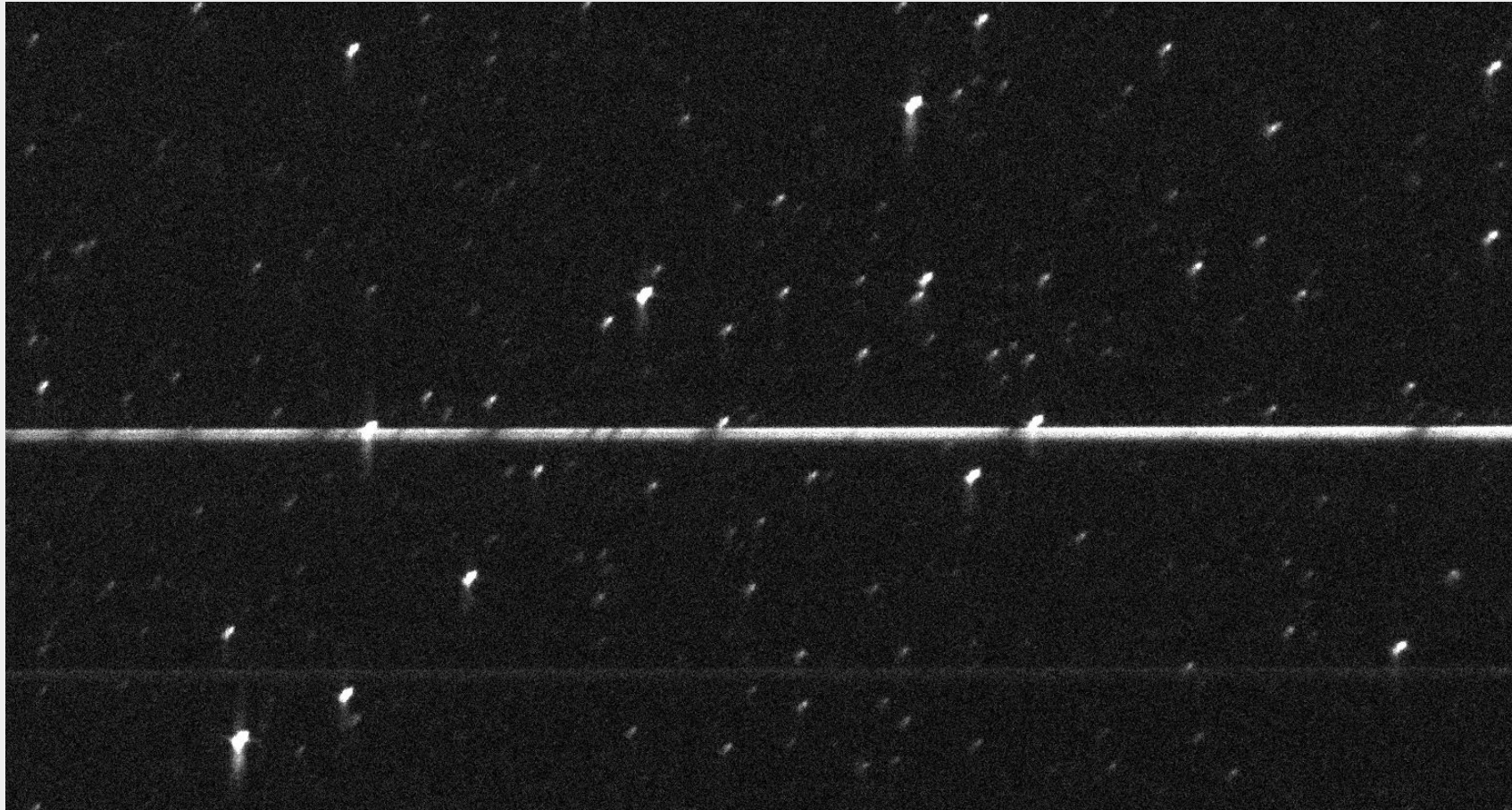
- Träger 70 x 70 x 12 mm<sup>3</sup>
- Aktive Fläche ca. 67 mm x 66 mm



Fassung für Einsatz  
am 4" ED Refraktor  
(3D-Druck)



## Das Problem: Kontaminierungen durch 0. Ordnungen ...





## ... und seine Lösung: Der „Beam-Blocker“



„Standardaufbau“:

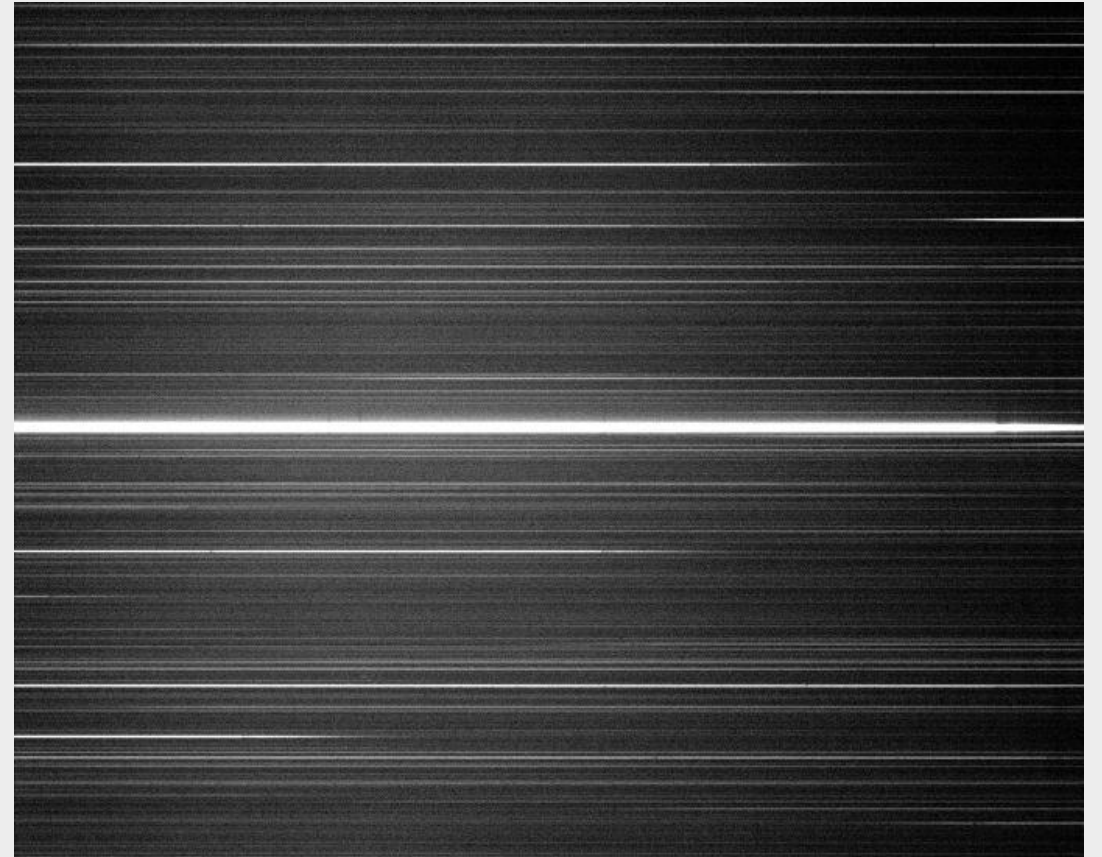
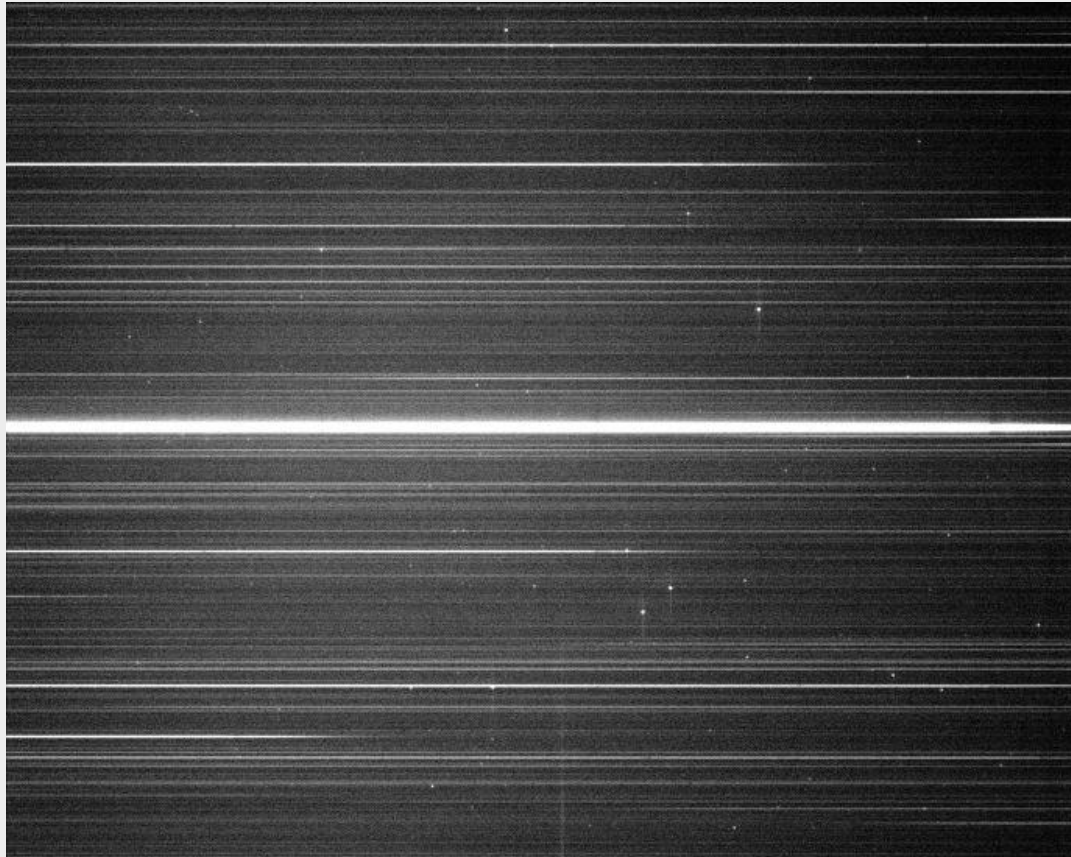
ED102/712

ZEISS-Objektivgitter & „Blocker“

Kamera: ATIK One

Montierung: Skywatcher EQ8

# Deneb ( $\alpha$ Cyg) ohne und mit Blocker



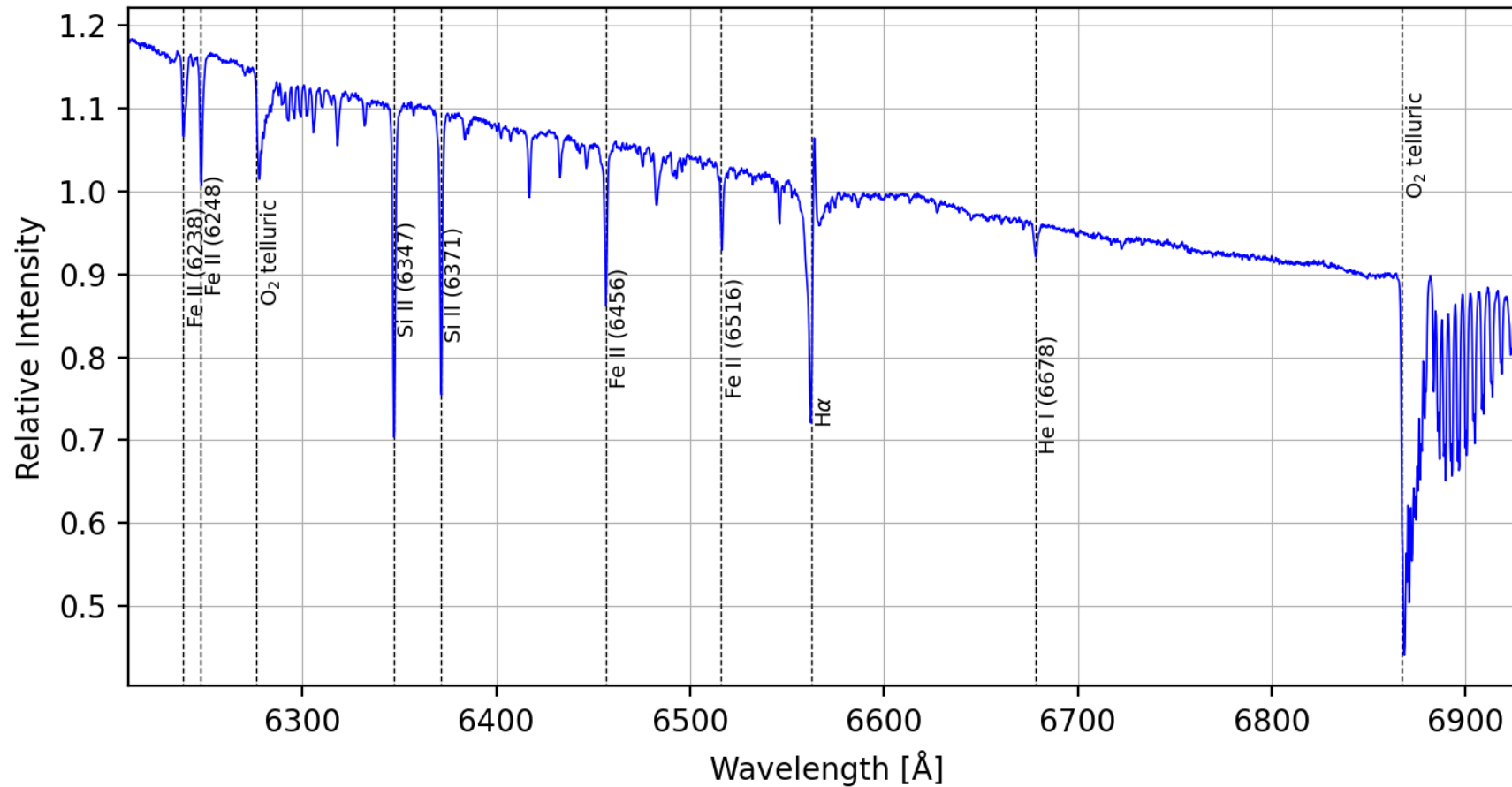
# Einsatzbereich Objektivgitterspektroskopie

- Sterne heller als ca. 8 mag
- Hohe Auflösung (ca.  $R = 5000 \dots 30000$ )
- Linienidentifikation (gute Trennung von benachbarten Linien)
- Analyse von Linienprofilen
- Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten (aus Verschiebung gegenüber Laborwellenlängen)
- Spektralklassen: Detaillierte Klassifizierung

# Deneb (Spektralklasse: A2Ia): „P-Cygni“ Linienprofil bei H $\alpha$

Alf Cyg (Deneb) A2Ia 17.12.2022 OG300Z ED80 f=500mm  
ATIK One 16\*60s Red Filter (Baader RGB Bandpass) - Response Corrected

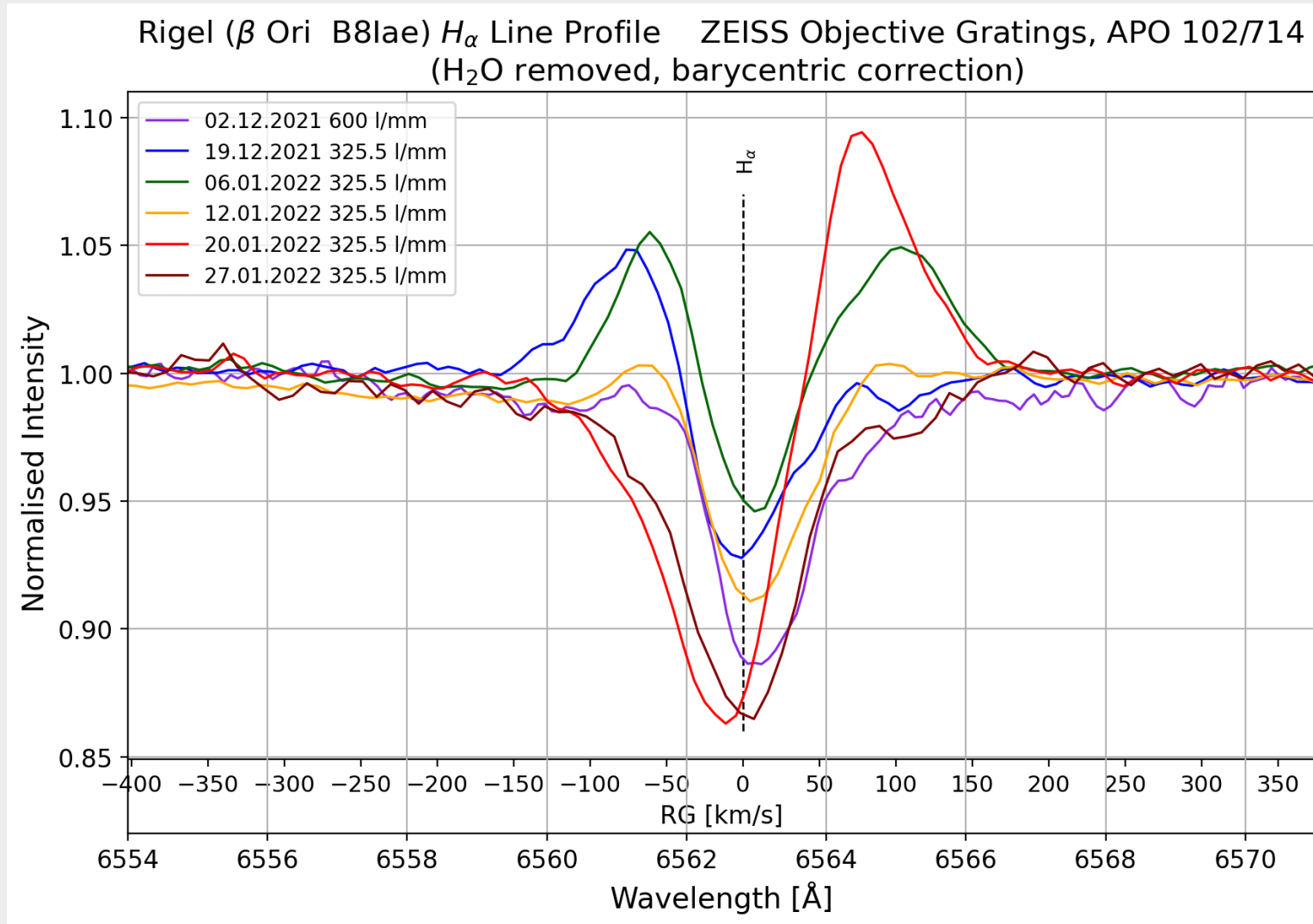
File: Deneb\_AT1B1R\_TOGi300Z2\_Gi221217\_ED80\_500\_A2g\_H57\_16m60s\_LTb1\_6139-6932cus.dat Giesen Observatory



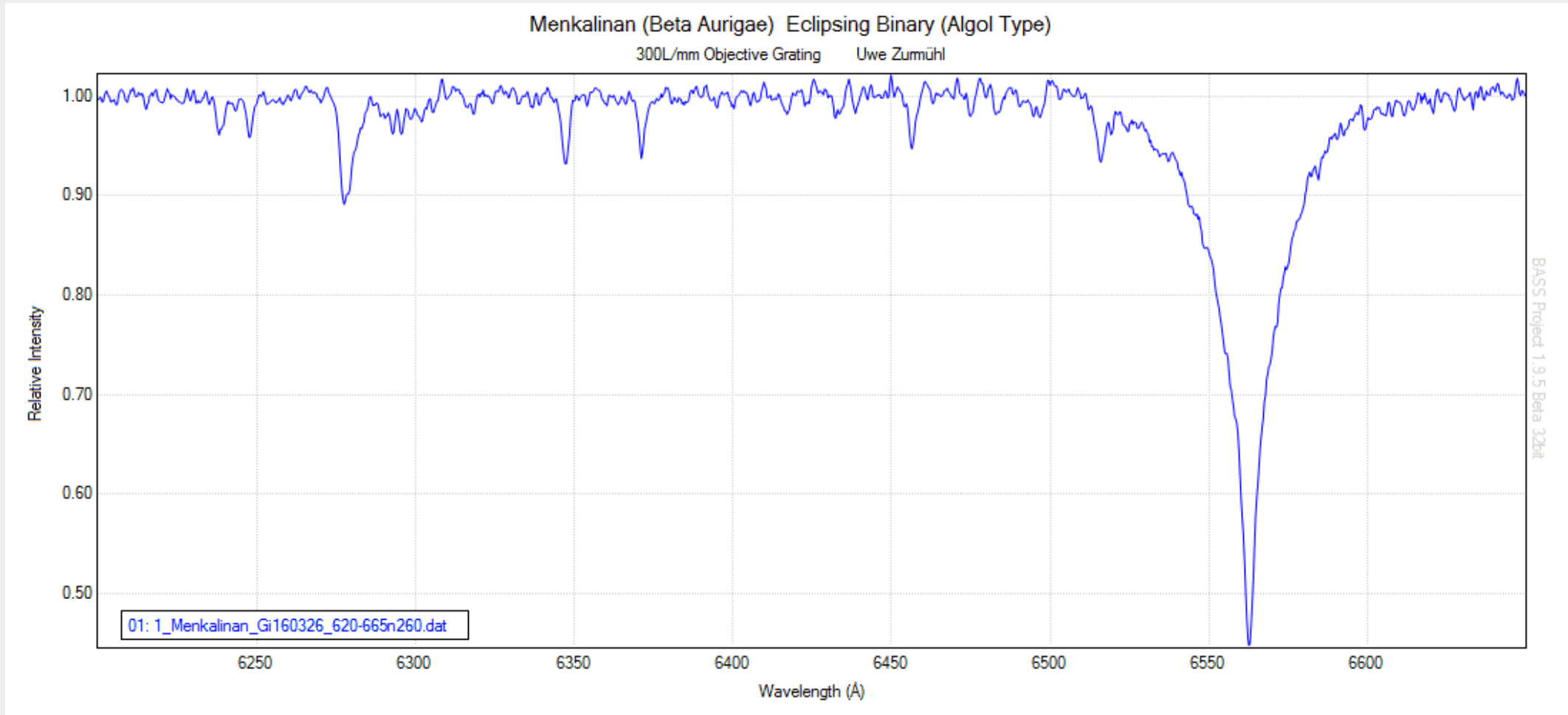
Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,8 \text{ \AA}$   
 $R \approx 8000 (@H\alpha)$



# Überriese mit starken Sternwinden: Rigel ( $\beta$ Ori, Spektralklasse: B8Iae)

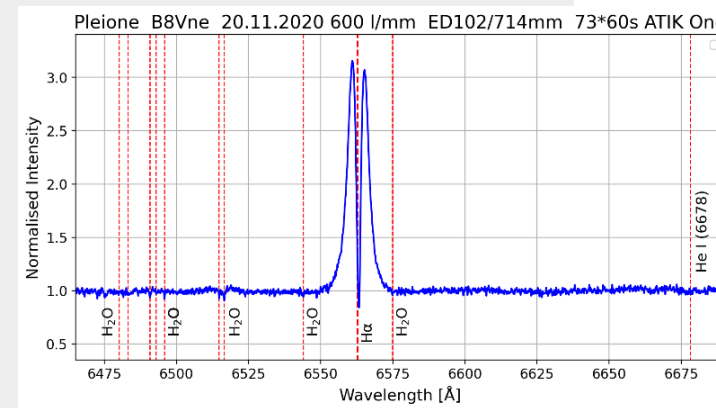
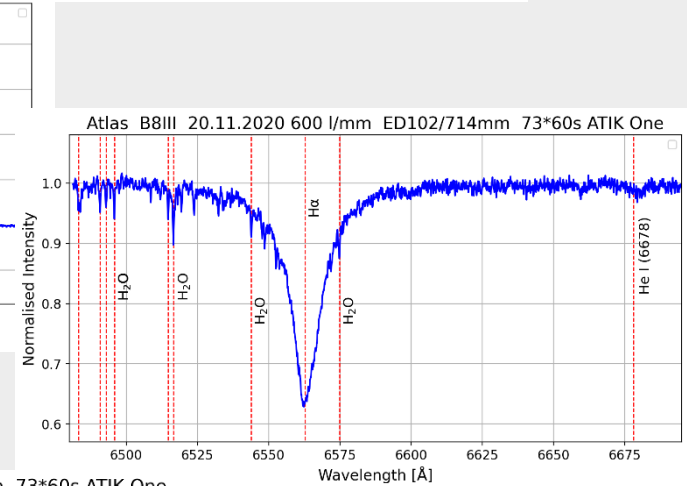
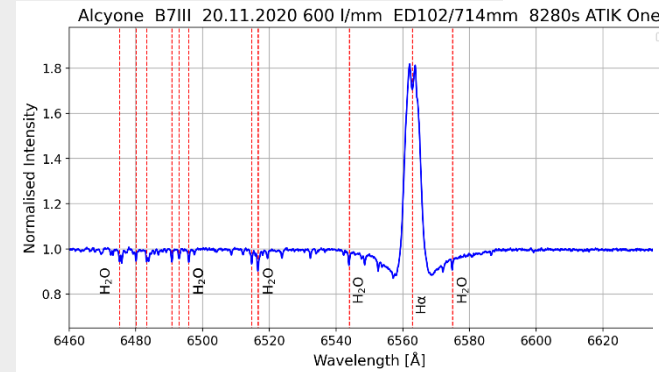
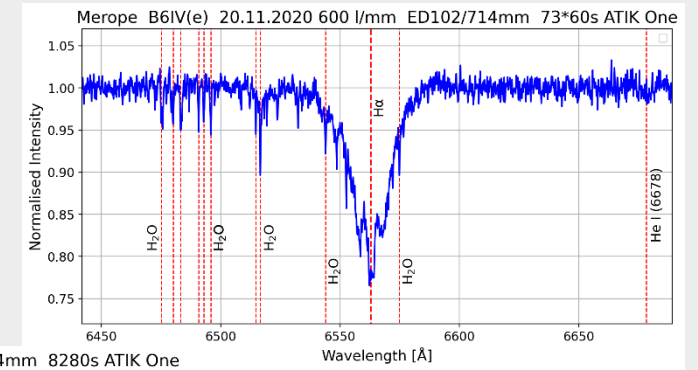
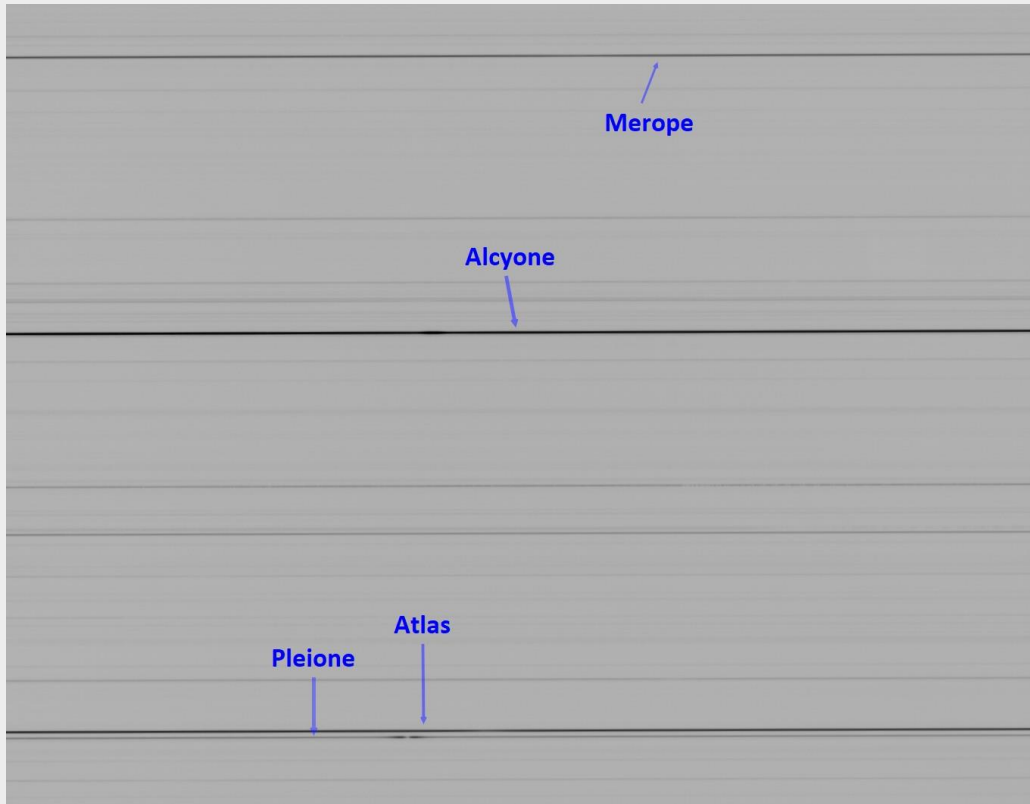


# Beispiel: Menkalinan ( $\beta$ Aur, Spektralklasse: A1IV-Vp) Binärsystem, Algol-Typ (SB2, Periode: 3,96 d)

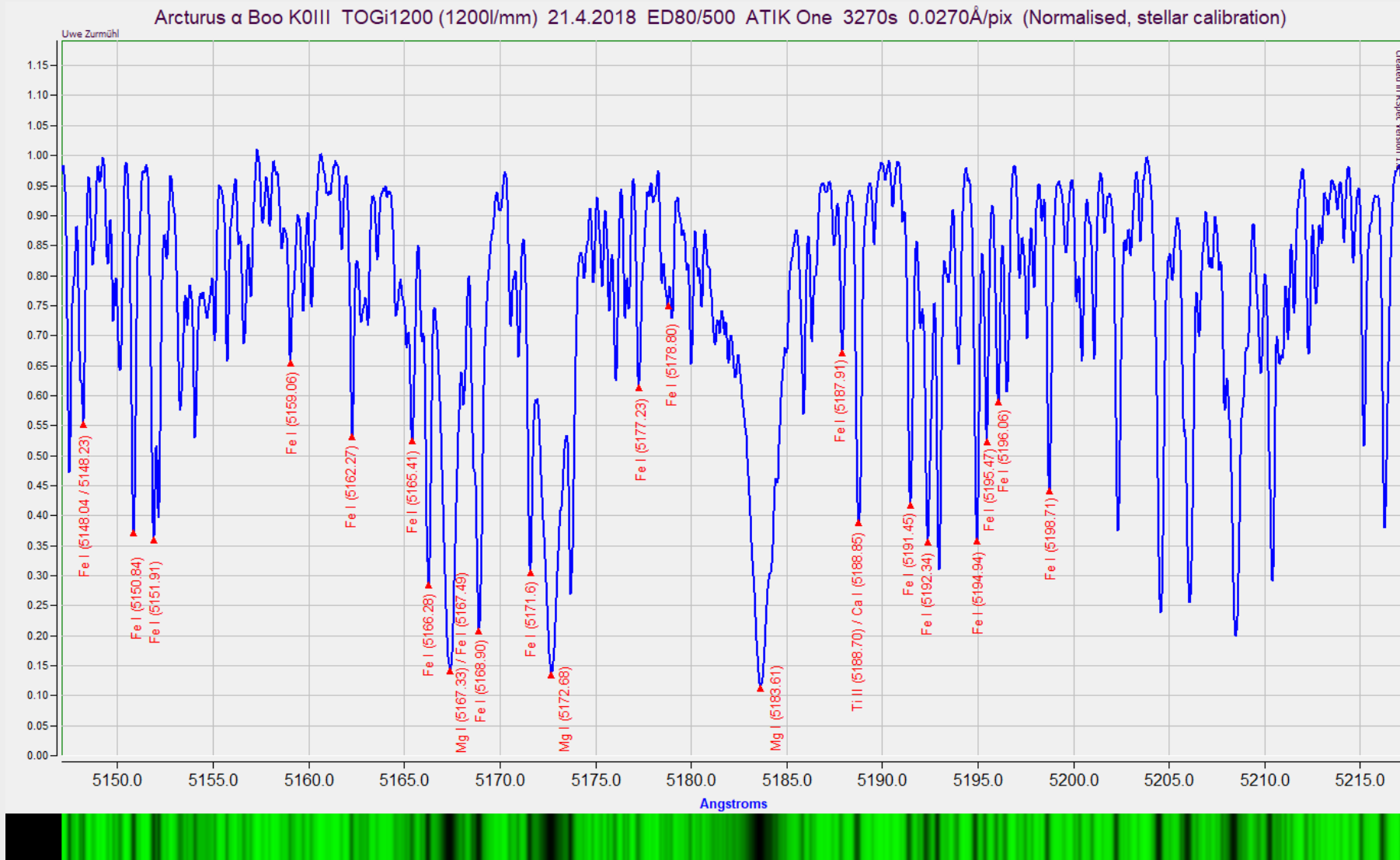


# Beispiel für Mehrfachspektren: Plejaden

20.11.2020 ZEISS Gitter 600L/mm ED102/714  
73\*60s ATIK One



# Beispiel für höchste Auflösung: Arktur ( $\alpha$ Boo, K1.5III), Bereich des „Mg-Tripletts“



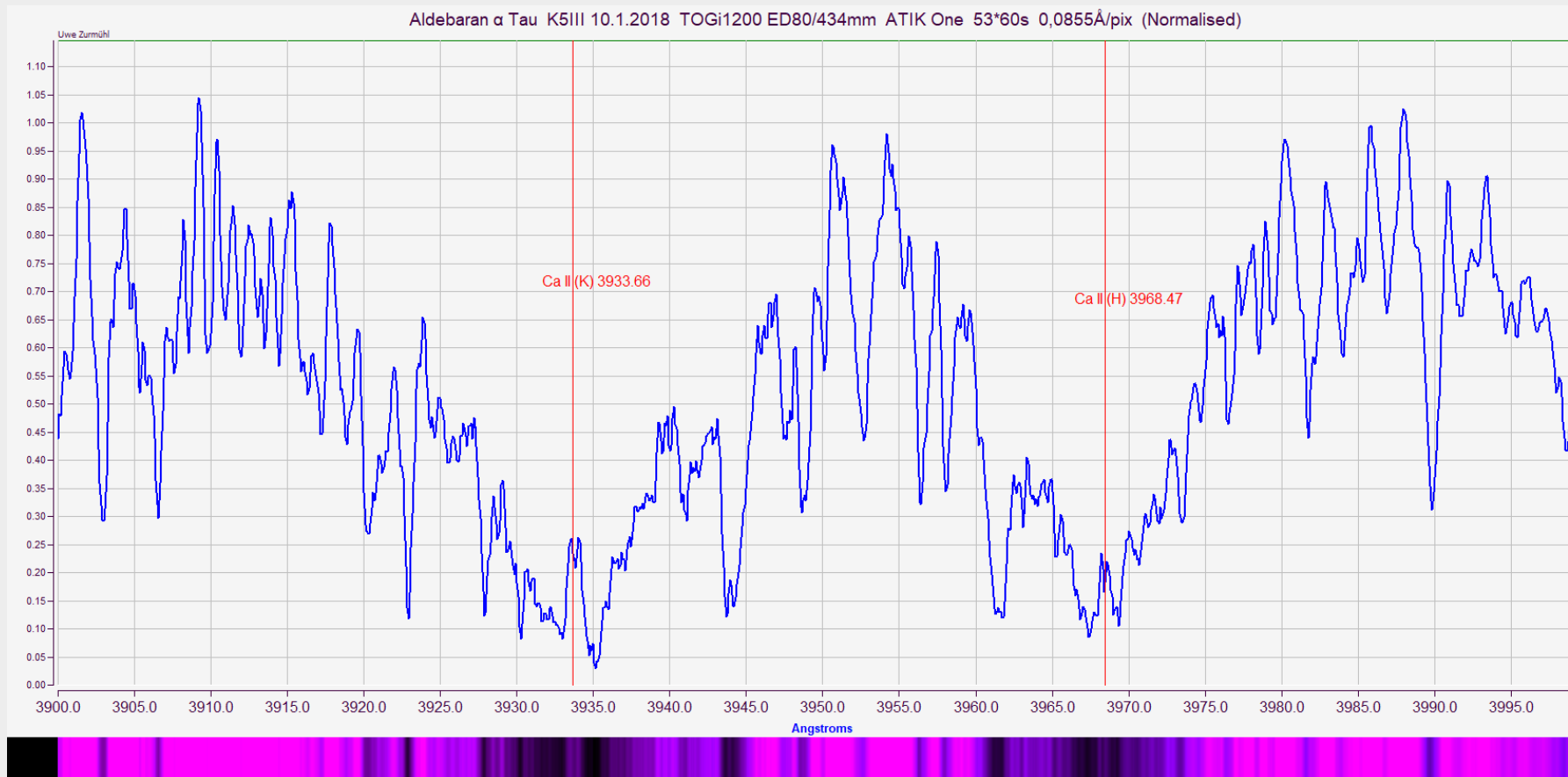
Gitter:  
Thorlabs 1200 L/mm  
50 mm x 25 mm

Optik:  
ED80/500  
@ f=1374 mm

Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,17 \text{ \AA}$   
 $R \approx 30000$  (bei  $5200 \text{ \AA}$ )

# Anwendung: Wilson-Bappu Effekt

➔ Absolute Helligkeit von Sternen der Spektralklasse G und kühler lässt sich bestimmen aus zentraler Emission im Kern von Ca II K Linie



Gitter:  
Thorlabs 1200 L/mm  
50 mm x 35 mm

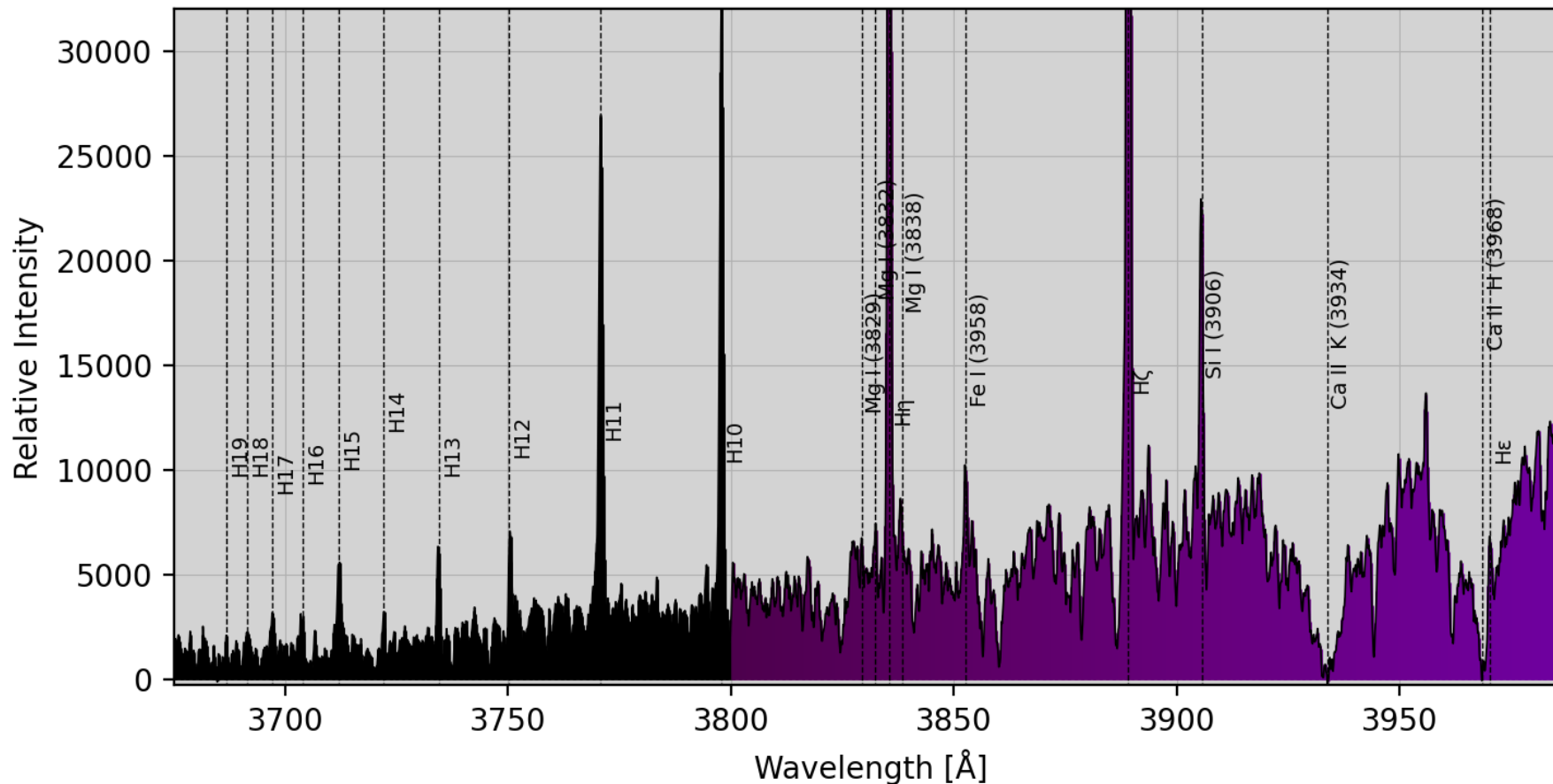
Optik:  
ED80/500  
@ f= 434 mm

Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,40 \text{ \AA}$   
 $R \approx 10000$  (bei 4000  $\text{\AA}$ )

# Linienprofile bei Mira: UV-Bereich

Omi Cet (Mira) M5-9IIIe+DA 04.12.2019 OG600Z ED102 f=622mm  
ATIK One 30\*120s - Response Not Corrected

File: Mira\_AT1B1No\_TOGi600Z\_Gi191204\_ED102\_622\_B3\_H34\_30m120s\_AAMs2CrprY4\_LSb3\_3656-3988.dat Giesen Observatory



Gitter:  
ZEISS 600 L/mm  
68 mm x 52 mm

Optik:  
ED102/714  
@ f = 622 mm

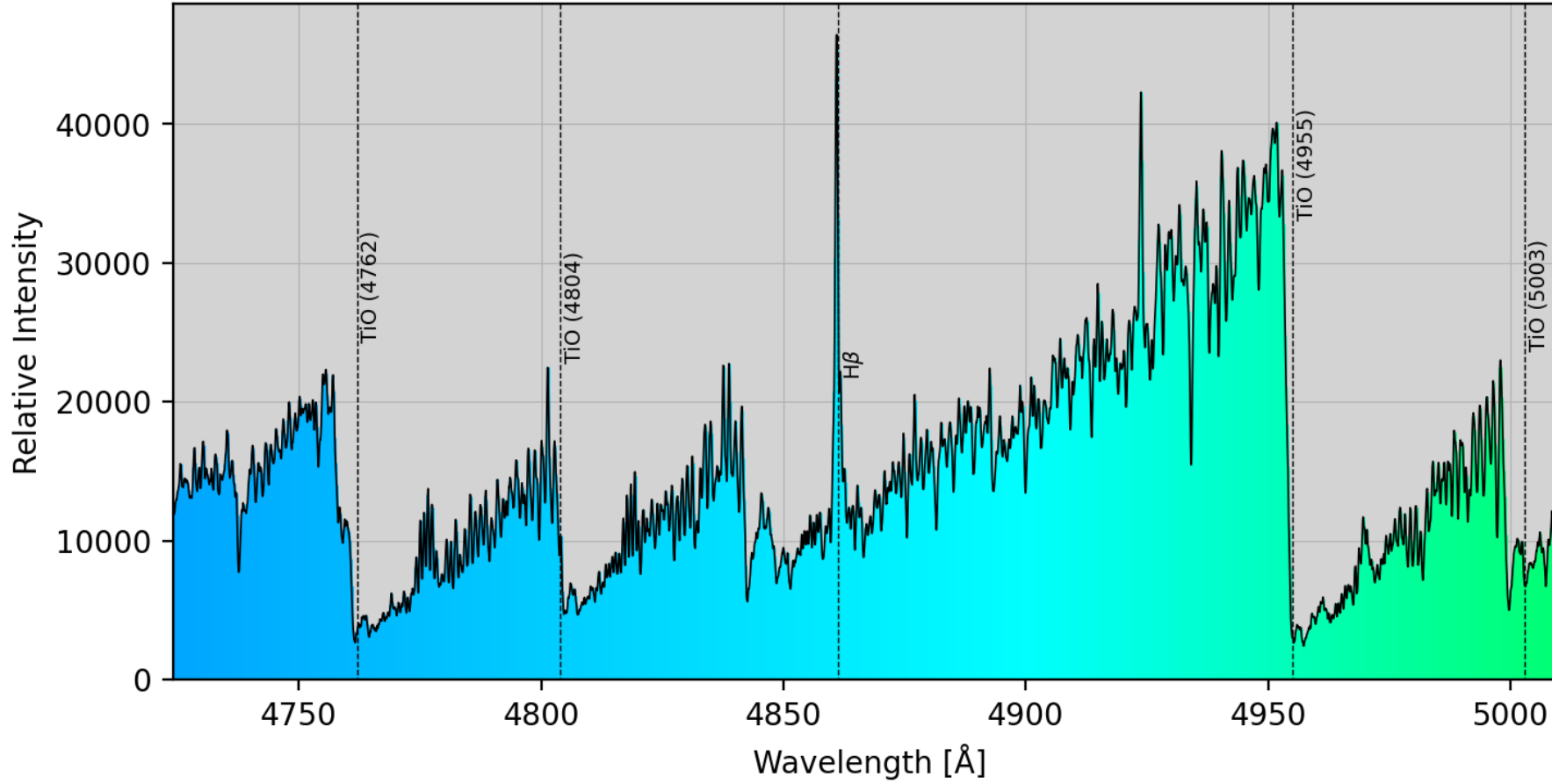
Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,40 \text{ \AA}$   
 $R \approx 10000$  (bei 4000 Å)



# Linienprofile bei Mira: Bereich um H $\beta$

Omi Cet (Mira) M5-9IIIe+DA 25.10.2019 OG600Z ED102 f=714mm  
ATIK One 17\*30s - Response Not Corrected

File: Mira\_AT1B1No\_TOGi600Z\_Gi191025\_ED102\_714\_F2\_H35\_17m30s\_AAMs2CrprY4\_LSPb3\_4724-5011.dat Giesen Observatory



Gitter:  
ZEISS 600 L/mm  
68 mm x 52 mm

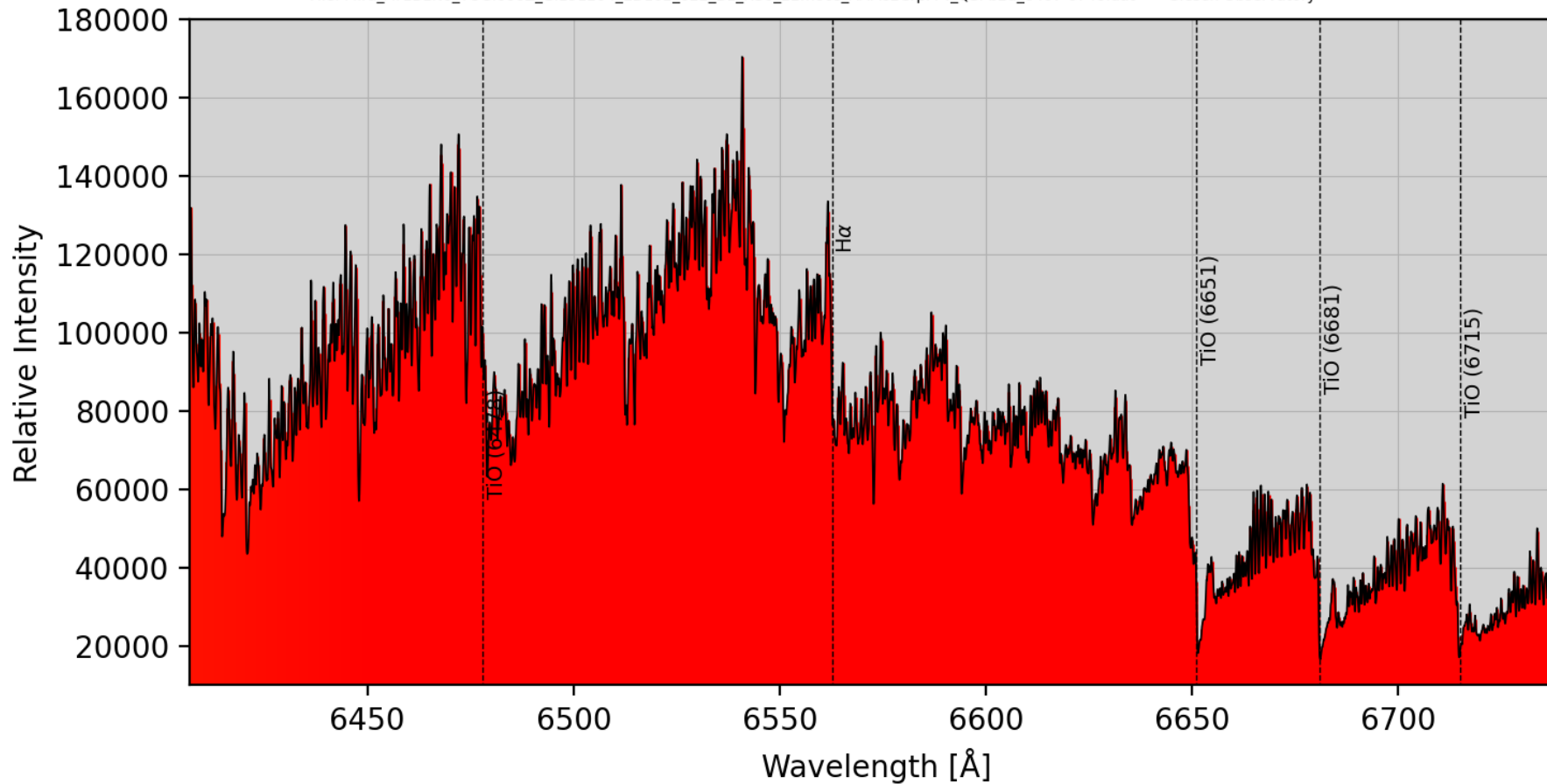
Optik:  
ED102/714

Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,40 \text{ \AA}$   
 $R \approx 12000$  (bei 4800  $\text{\AA}$ )

# Linienprofile bei Mira: Bereich um H $\alpha$

Omi Cet (Mira) M5-9IIIe+DA 04.12.2019 OG600Z ED102 f=622mm  
ATIK One 22\*60s - Response Not Corrected

File: Mira\_AT1B1No\_TOGi600Z\_Gi191204\_ED102\_622\_B1\_H30\_22m60s\_AAMs2CrprY4\_QSPb2d\_6407-6740.dat Giesen Observatory



Gitter:  
ZEISS 600 L/mm  
68 mm x 52 mm

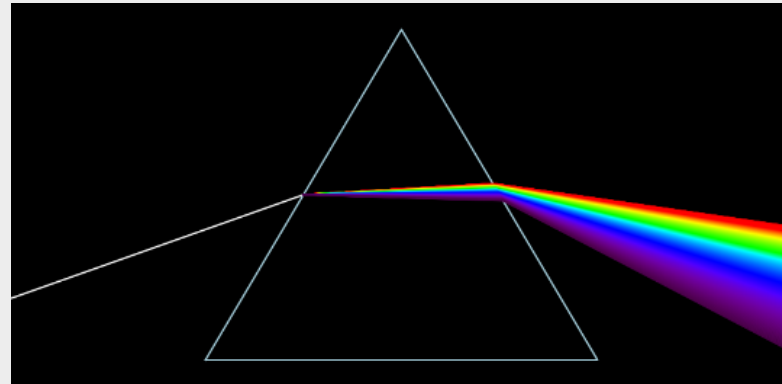
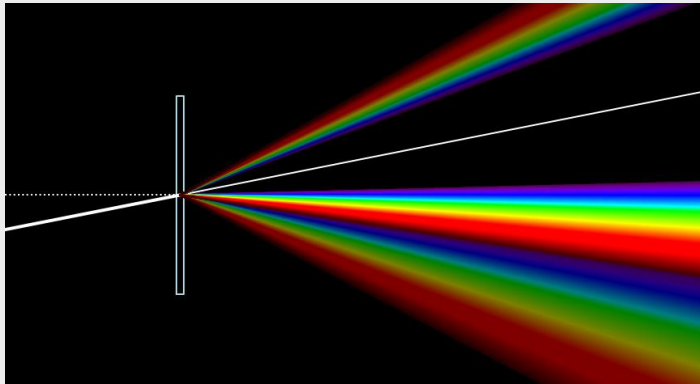
Optik:  
ED102/714  
@ f = 622 mm

Auflösung:  
 $\Delta\lambda \approx 0,40 \text{ \AA}$   
 $R \approx 16000$  (bei 6500 Å)

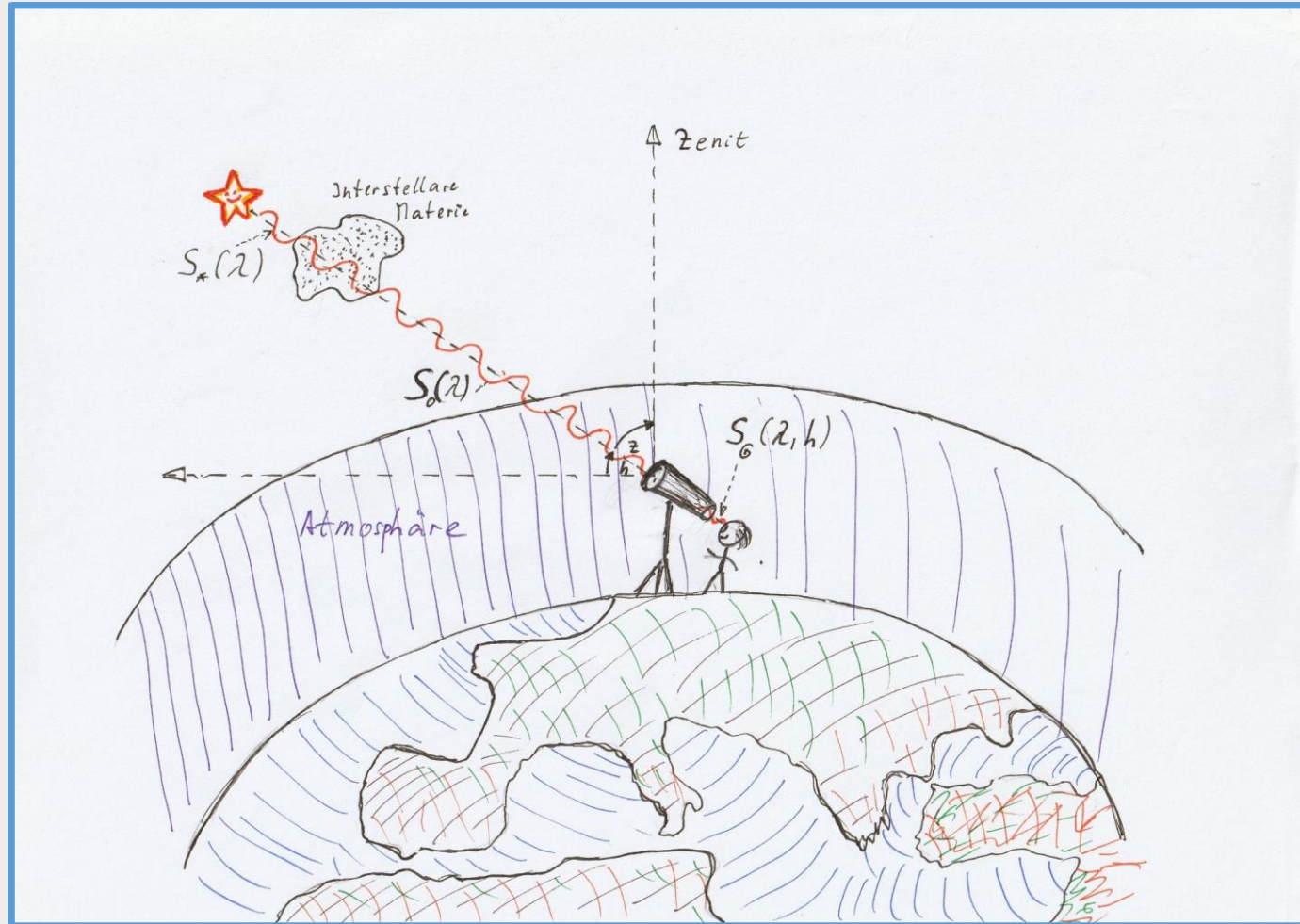
## Literaturhinweise (Objektivgitter)

- (1) M. Wolf, *Versuche mit dem Objektivgitter*, Astron. Nachrichten Bd. 213, Nr. 5092, S. 50 ff. (1921)
- (2) J. Strong and F. Zwicky, *Objective Transmission Gratings for Large Schmidt Telescopes*, Applied Optics, Vol. 5, No.5 (1969)
- (3) M. Köbberling, *Sternspektren beobachten mit dem Eigenbau-Objektivgitter*, SuW 6/1998, S. 537 ff.
- (4) M. Dubs, (2018): *Meteor Spectroscopy OHP2018*
- (5) E. Wischnewski, *Astronomie in Theorie und Praxis*, 8. Auflage 2018, S. 263 ff.
- (6) U. Zurmühl, *Objective Gratings for Amateurs*, SPEKTRUM 55 (2019) p. 14, <https://spektroskopie.vdsastro.de/files/pdfs/Spektrum55.pdf>
- (7) U. Zurmühl, *Spectroscopy With Medium-Sized Objective Gratings*, BAV Magazine Spectroscopy 10, p. 25 (2021), [https://www.bav-astro.eu/images/BAVMS\\_10-2021.pdf](https://www.bav-astro.eu/images/BAVMS_10-2021.pdf)

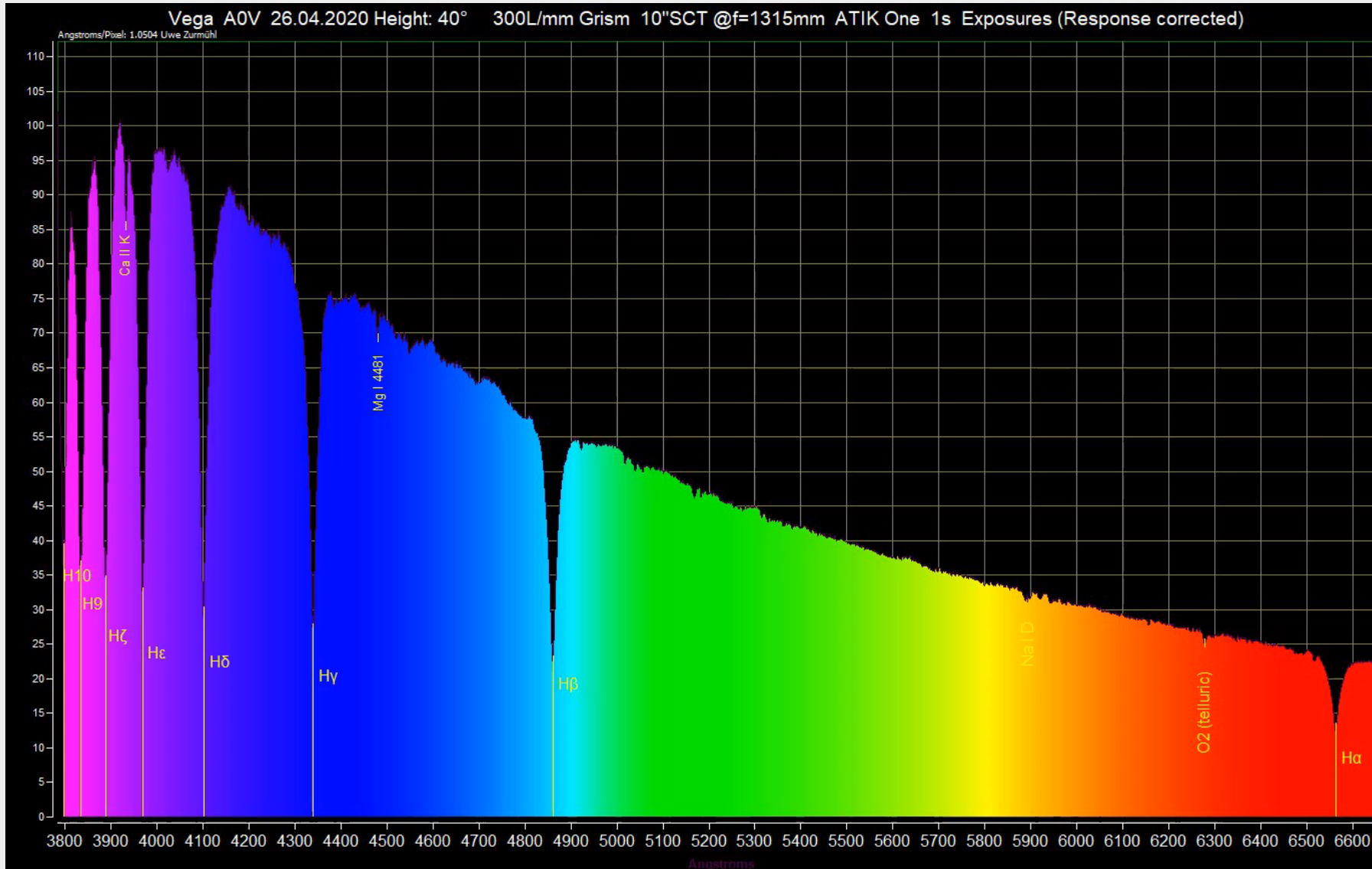
# III) Spektrophotometrie



# Das Problem: Verfälschung des originalen Spektrums auf seinem Weg von der Quelle zu Detektor

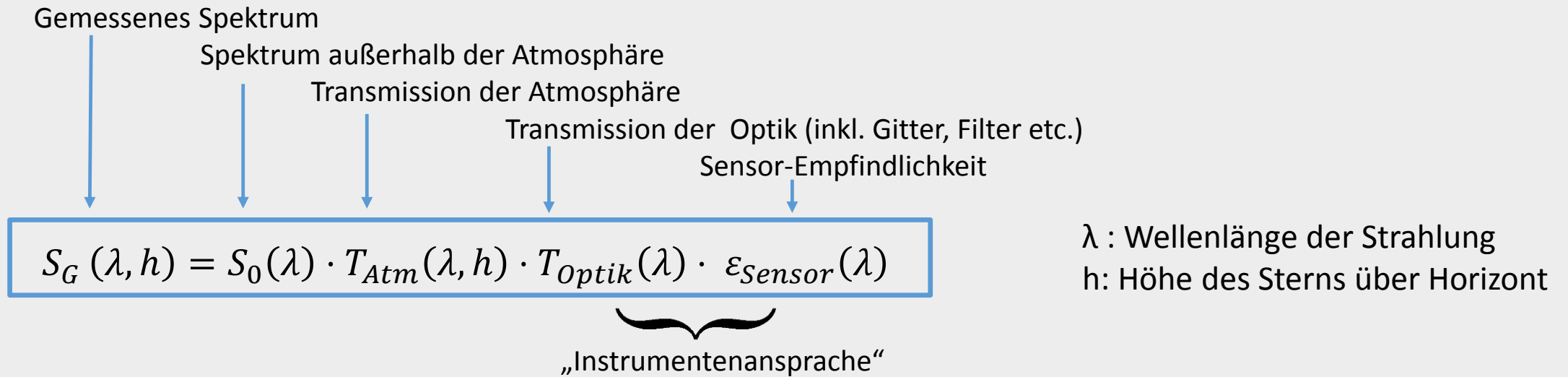


# Szintillation: Genügend lange Messzeiten bzw. Mittelung notwendig!





## Veränderung der Strahlung / des Spektrums auf dem Weg von der Quelle zum Sensor (bei Vernachlässigung der interstellaren Absorption)

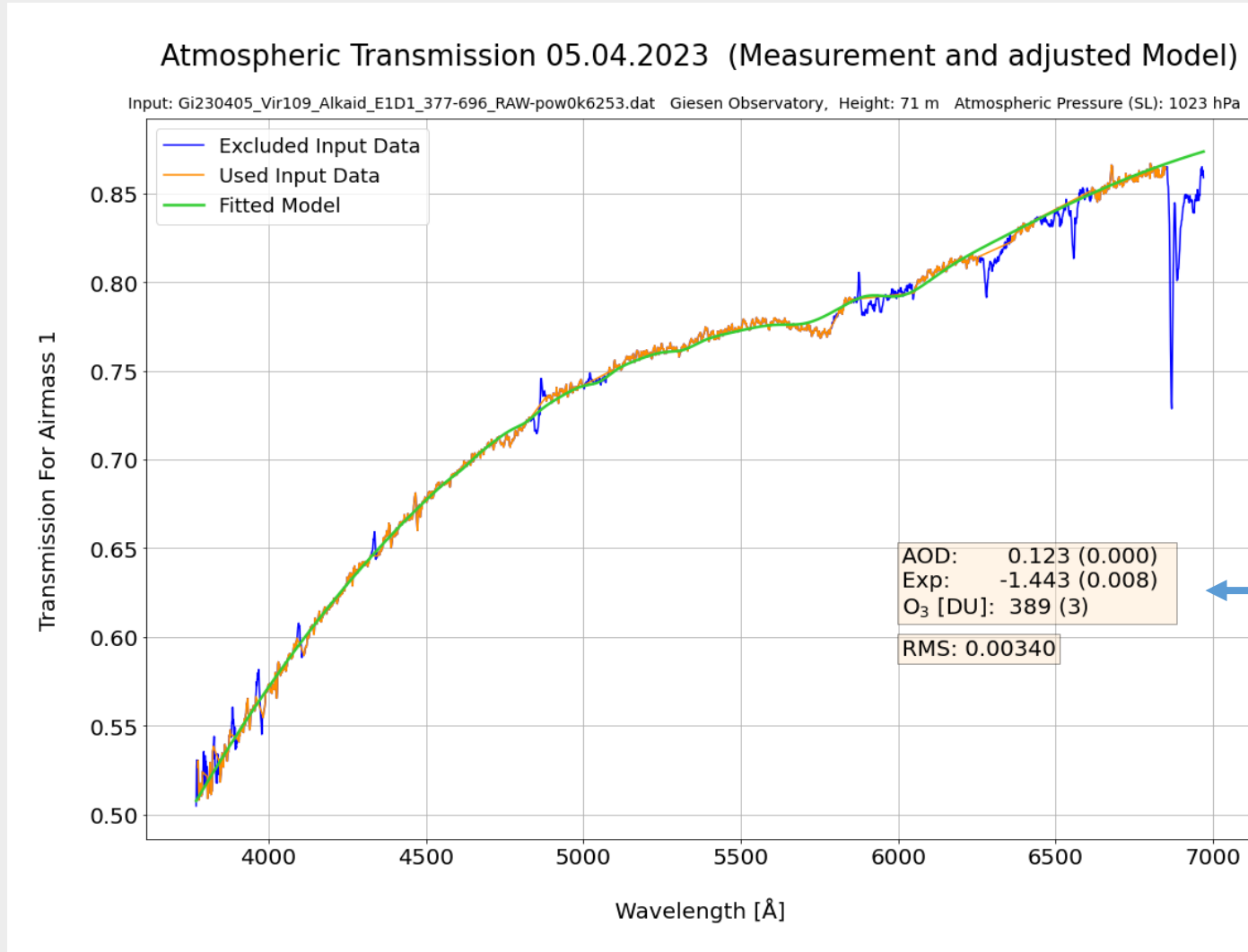


*Einfaches Atmosphärenmodell:*

$$T_{Atm}(\lambda, h) = T_{Rayleigh}(\lambda, h) \cdot T_{Aerosol}(\lambda, h) \cdot T_{Ozon}(\lambda, h)$$

- Rayleigh-Streuung: Konstant für eine gegebene „Luftmasse“, recht genau zu berechnen
- Aerosole: Transmission variabel in Form und Größe, abhängig von Staubpartikeln etc., Modellberechnung
- Ozon: Variabel in der Größe des Effektes, Wellenlängenabhängigkeit aber gut bekannt (Tabellen)
- Hier nicht berücksichtigt: O<sub>2</sub> und Wasserdampf!

# Messung und Korrektur der atmosphärischen Transmission



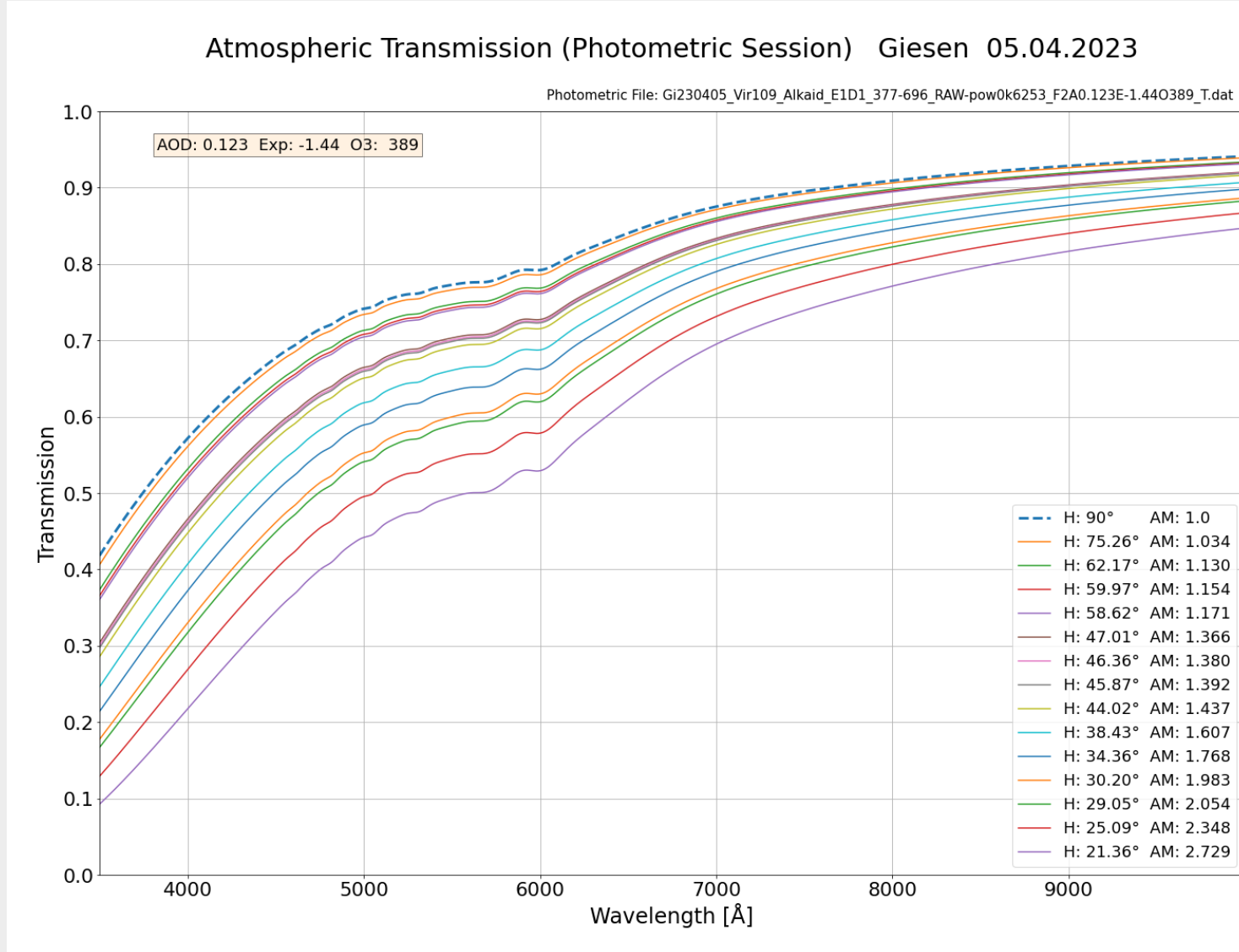
Verwendete Standard-Sterne (Calspec):

109 Vir (Höhe 21,4°, Luftmasse 2,73)

Alkaid (Höhe 62,2°, Luftmasse 1,13)

Parameter für beste Anpassung

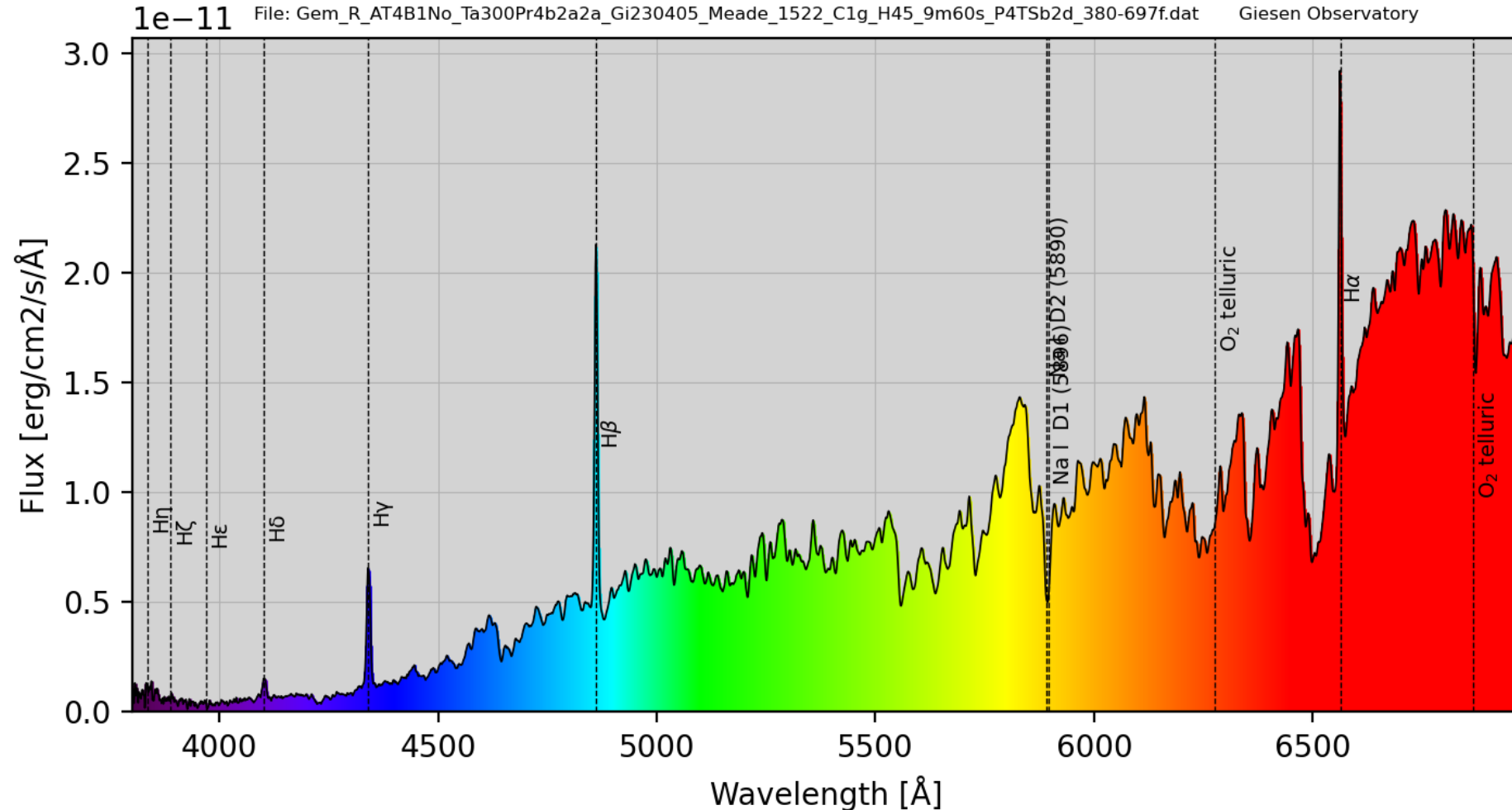
# Messung und Korrektur der atmosphärischen Transmission



Korrekturkurven für  
alle am 5.4.2023  
gemessenen Sterne

# Beispiel: Mira-Variable R Gem

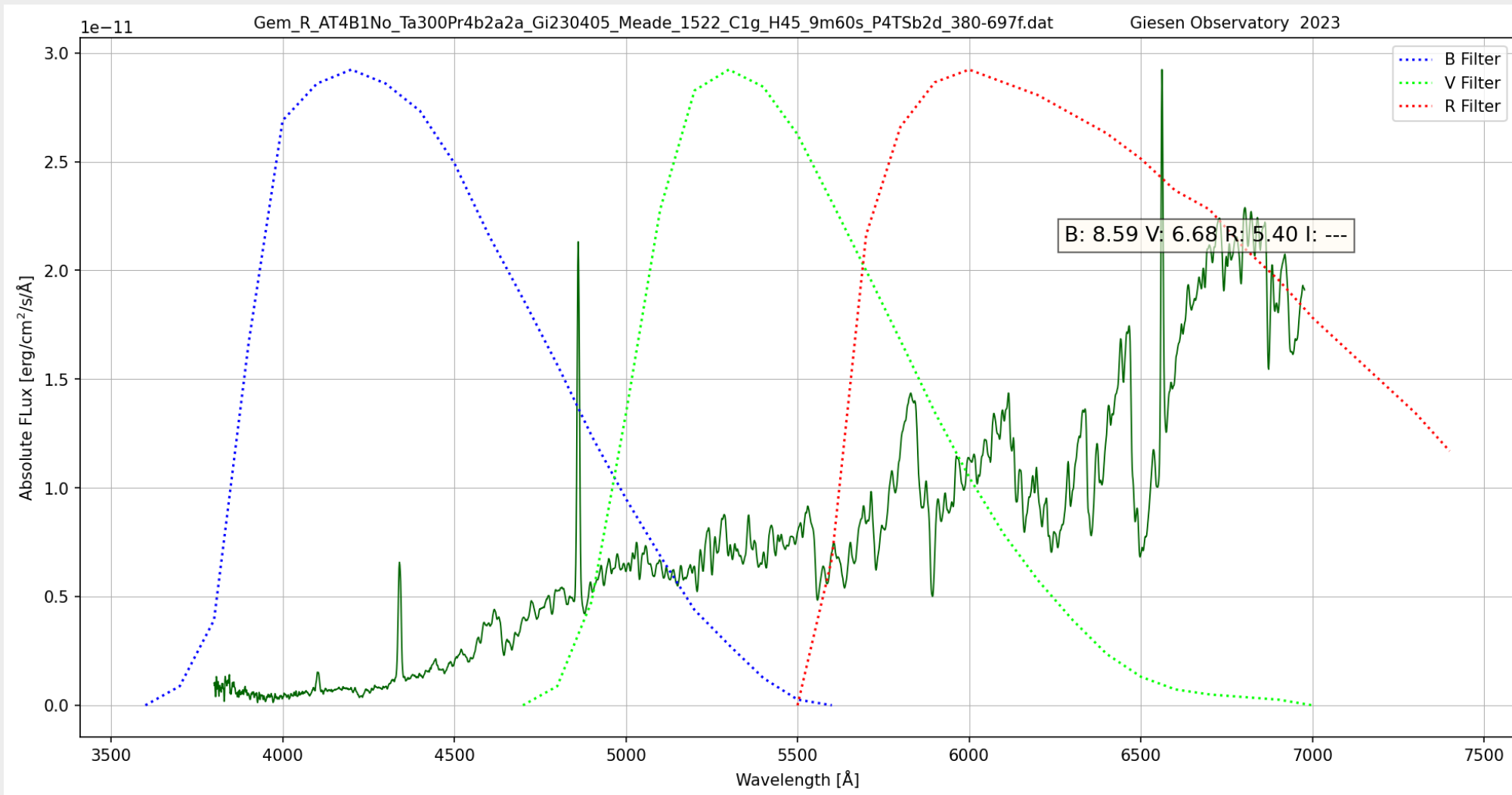
R Gem S3.5-6.5/6e 05.04.2023 LX200 10" f=1522mm  
ATIK 460EXm 9\*60s - Absolute Flux



1 erg = 10<sup>-7</sup> Joule

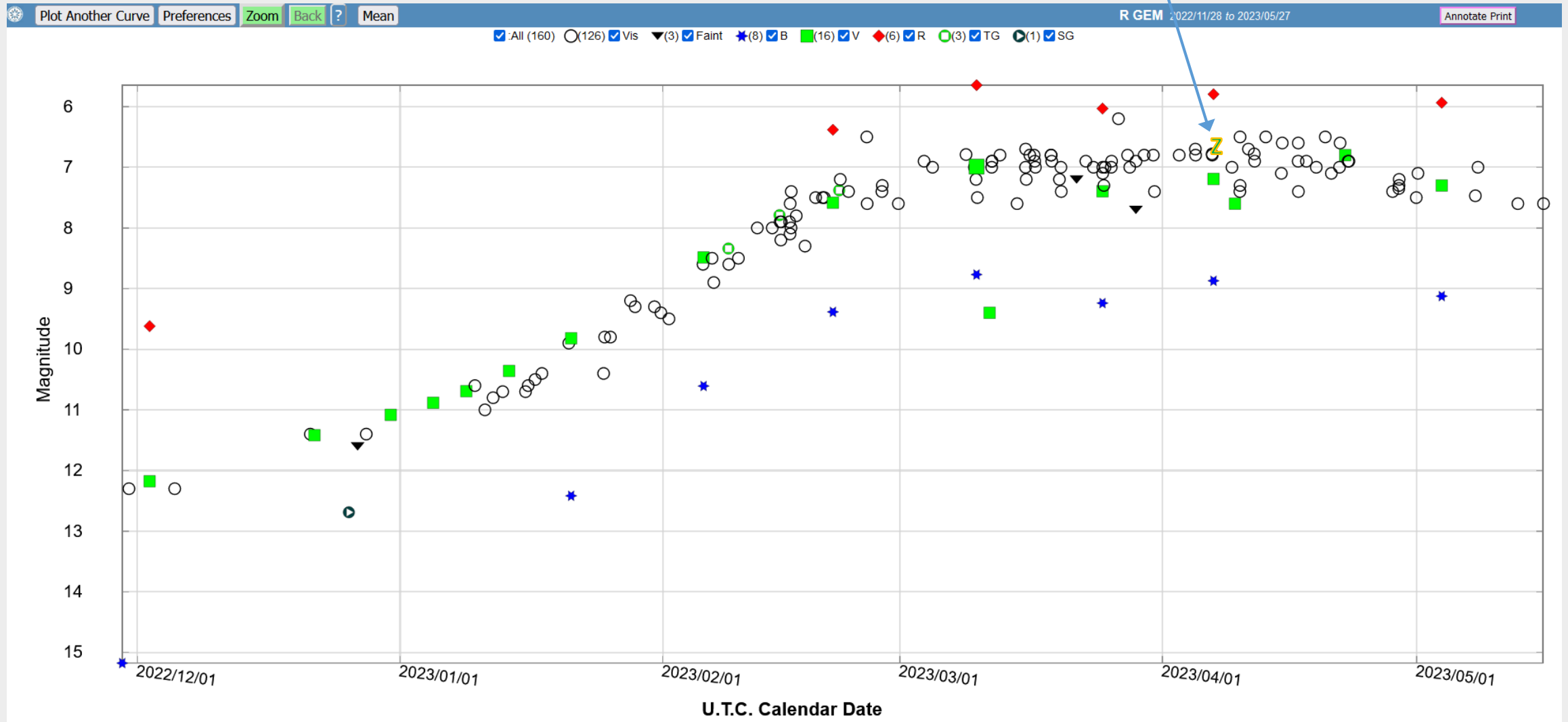
1 Å = 0,1 nm = 10<sup>-10</sup> m

# Beispiel: Mira-Variable R Gem - Photometrie



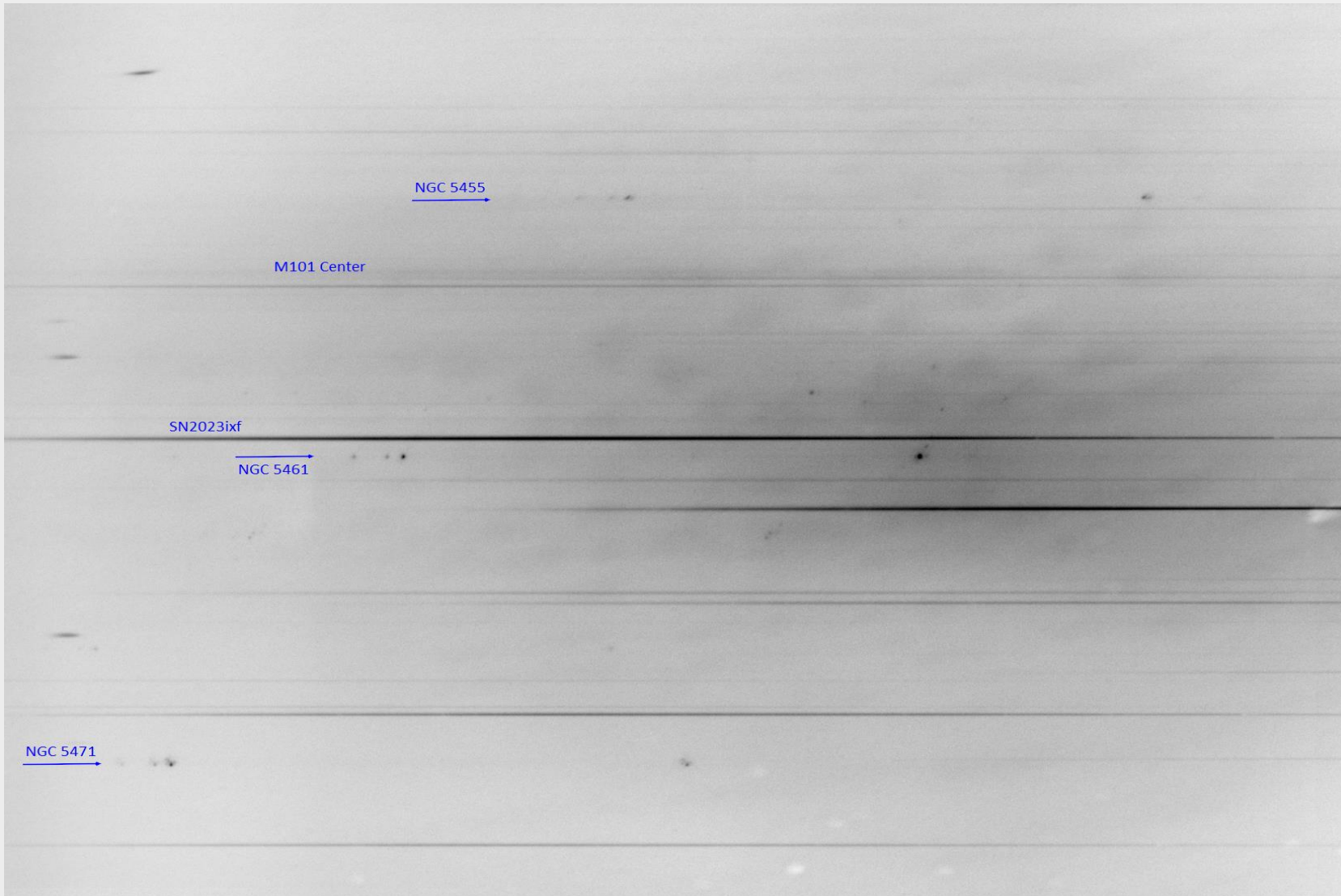
# R Gem - Vergleich mit AAVSO-Daten

Eigener V – Wert  
vom 5.4.2023





# Supernova SN2023ixf in M101 (Entdeckt: 19.5.2023, Typ: SN IIIn)



28.5.2023

14" Celestron @ f = 2270mm

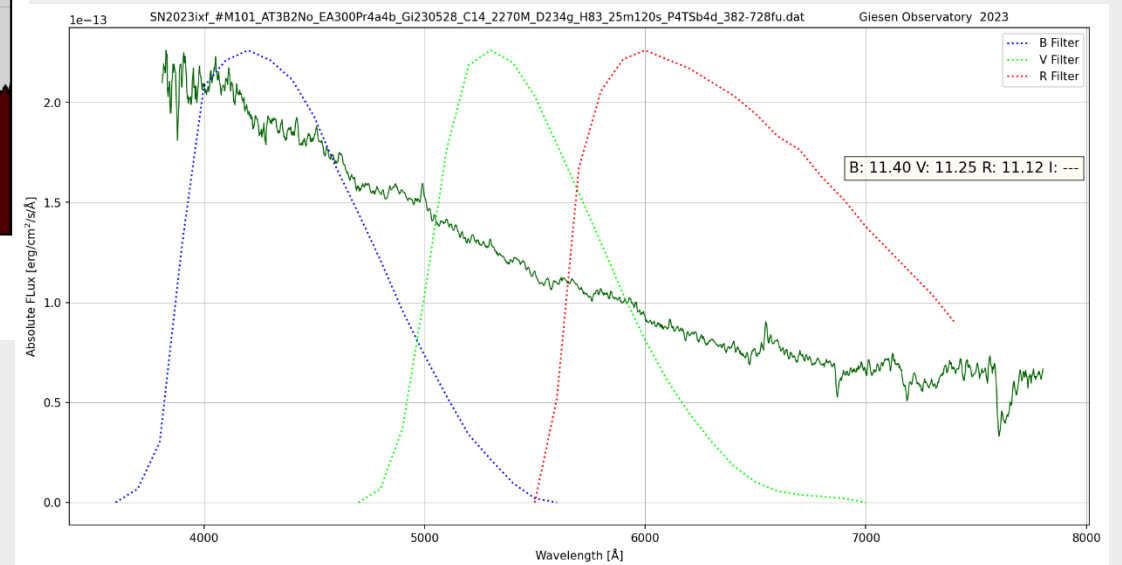
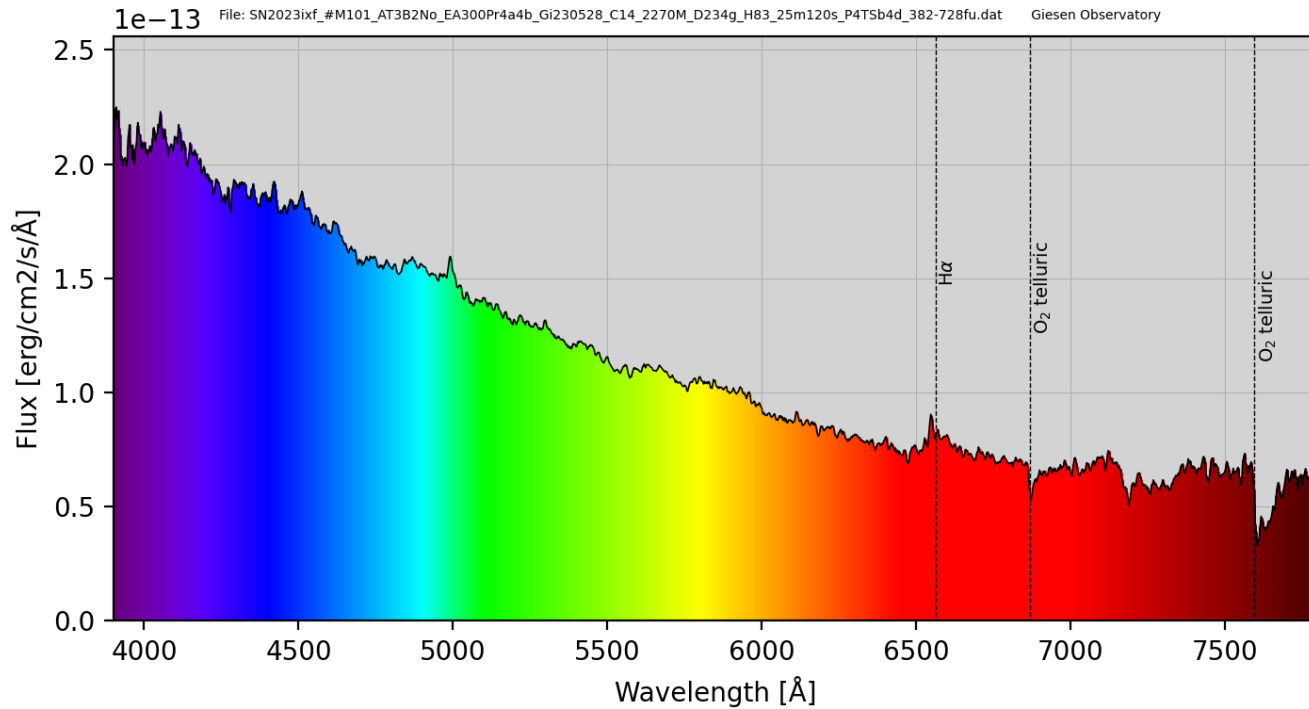
Grism 300L/mm 2\*4°

ATIK 383L+

25 \* 120 s

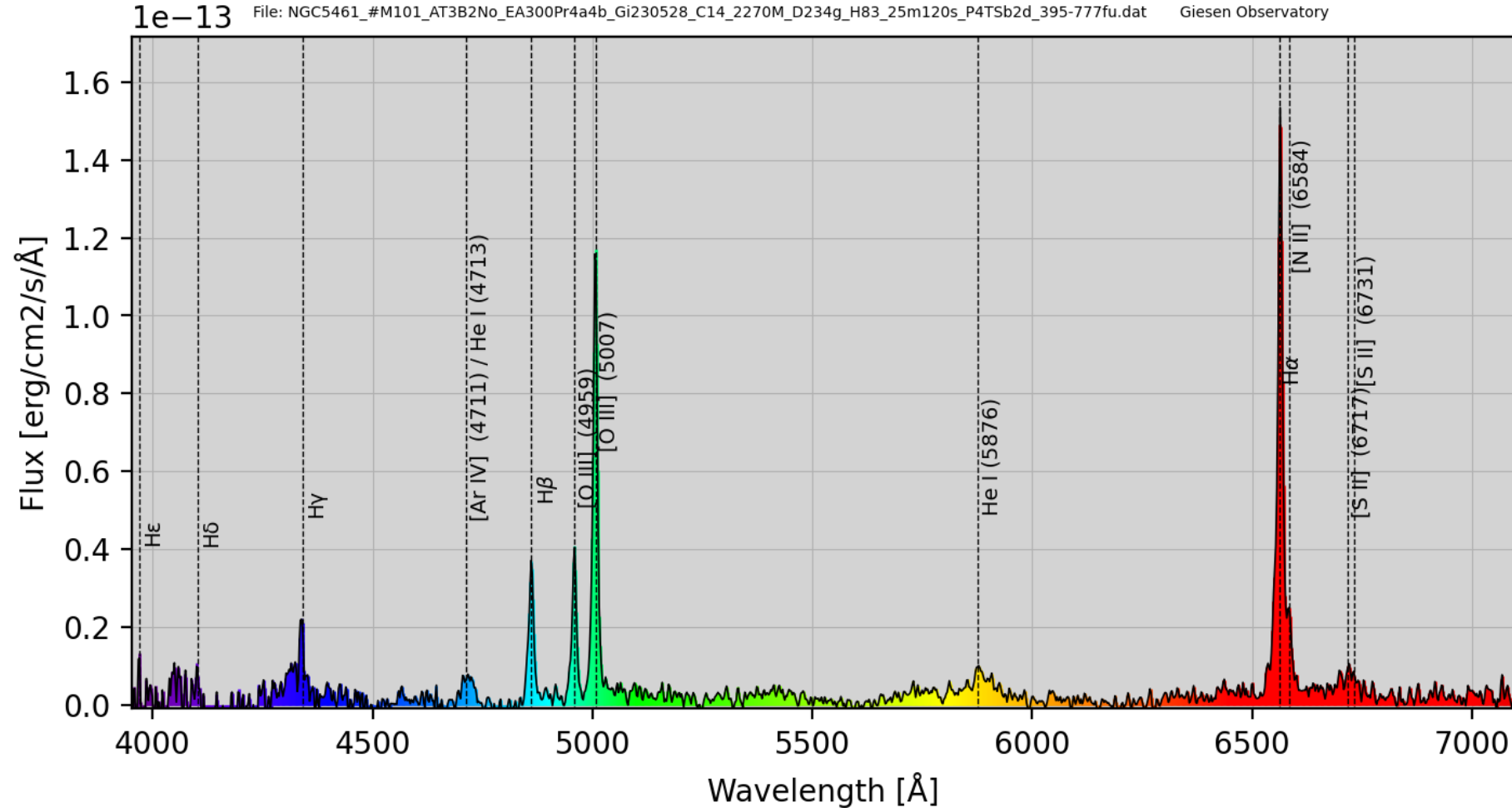
# Supernova SN2023ixf - Photometrie

SN2023ixf M101 28.05.2023 Grism300 C14 f=2270mm  
ATIK 383L+ 25\*120s - Absolute Flux



# Supernova SN2023ixf – Benachbarte HII-Region NGC 5461

NGC5461 M101 H II Region 28.05.2023 Grism300 C14 f=2270mm  
ATIK 383L+ 25\*120s - Absolute Flux



# Literaturhinweise (Spektrophotometrie, Transmission Atmosphäre)

- (1) J. Wempe, *Die Wellenlängenabhängigkeit der atmosphärischen Extinktion*, Mitteilungen des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam Nr. 21, 1944
- (2) D.S. Hayes and D.W. Latham, *A REDISCUSSION OF THE ATMOSPHERIC EXTINCTION AND THE ABSOLUTE SPECTRAL-ENERGY DISTRIBUTION OF VEGA*, 1975, ApJ 197, 593
- (3) Chr. Buil, speziell: [http://www.astrosurf.com/buil/calibration2/absolute\\_calibration\\_en.htm](http://www.astrosurf.com/buil/calibration2/absolute_calibration_en.htm)

*Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!*

