

Die internationale Beobachtungskampagne „Photometrie und Spektroskopie an P Cygni“

Ernst Pollmann und Thilo Bauer

Die internationale Beobachtungskampagne „Photometrie und Spektroskopie an P Cygni“ als Gemeinschaftsprojekt von AAVSO, ASPA und BAV hat seit dem Start im November 2008 bis heute zu ziemlich ermutigenden Resultaten geführt. Ziel der Kampagne ist die Fortführung der Untersuchungen von Markova [1] und Markova et al. [2] zur Antikorrelation zwischen der H α -Äquivalentbreite und der photometrischen V-Helligkeit des Sterns. Bevor die bisherigen Ergebnisse der Kampagne dargelegt werden, sollen einige typische, amateur-spektroskopisch beobachtbare Merkmale von P Cygni in Erinnerung gerufen werden.

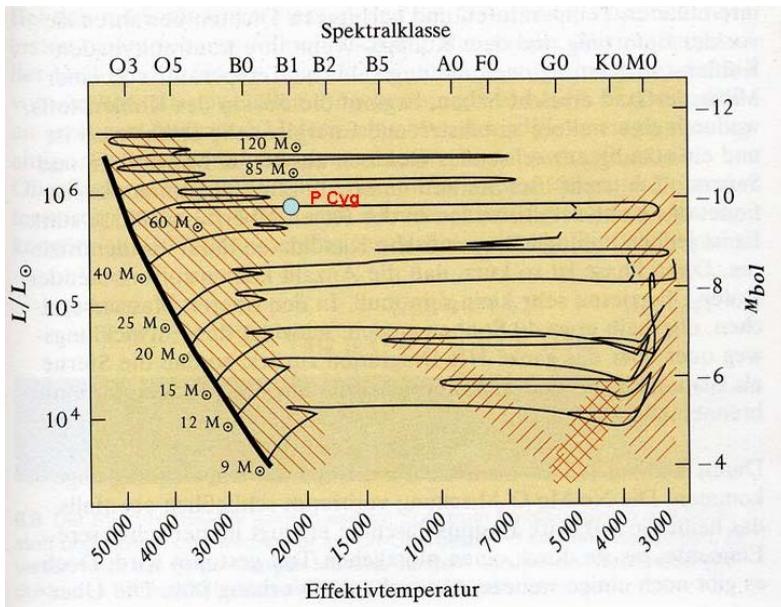


Abb. 1: Die absolut massereichsten Sterne (> 50 Sonnenmassen) durchlaufen im HRD eine sehr instabile Phase als Leuchtkräftige Blaue Veränderliche (LBV's), verbunden mit starken Variationen in ihrer Helligkeit, Farbe und ihrem Spektrum; Gravitation und Druck halten sich nicht mehr die Waage, die Sterne werden instabil (Quelle: J. B. Kaler, Die physikal. Welt d. Sterne, Spektr. Akadem. Verlag, Heidelberg-Berlin, 2000)

Die seltenen, absolut massereichsten und hellsten Überriesen mit mehr als 50 Sonnenmassen und absoluten Helligkeiten im Bereich von $-7,5$ bis $-9,5$ mag und Spektraltypen zwischen B und F im Hertzsprung-Russell-Diagramm (Abb. 1), dies sind die sog. „Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen“ (LBV) des Typs S Dor wie etwa η

Car und P Cyg. Sie durchlaufen eine sehr instabile Phase mit starken Variationen in ihrer Helligkeit, Farbe und in ihren Spektren. Gravitation und Druck halten sich nicht mehr die Waage, die Sterne werden instabil.

Es entwickelt sich ein starker Sternwind, der den Zentralstern als Nebel umhüllt. Die LBV's zeigen einen weiten Bereich von Helligkeitsschwankungen, rasche kleine Änderungen mit etwa 0.01 mag in Stunden bis hin zu langsamen Änderungen der Größenordnung 2 mag in Jahren bis Jahrzehnten und gelegentlichen, stärkeren Helligkeitsausbrüchen.

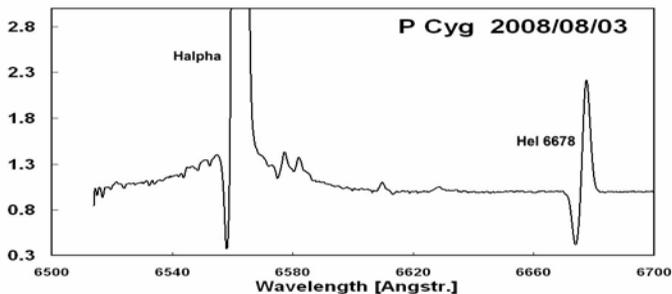


Abb. 2: Ausschnitt aus einem P Cyg-Spektrum von $\sim 6500\text{-}6700 \text{ \AA}$

Die Spektren dieser Sterne sind reich an Emissionslinien, die vielfach sog. P Cygni-Profile aufweisen (Abb.2): eine breite Emission mit einer zur kurzwelligen Seite verschobenen Absorptionskomponente, die auf ausströmende Materie zurückzuführen ist. Die Geschwindigkeiten erreichen einige 100 km/s, wobei der durch diesen Sternwind bedingte Massenverlust bei den verschiedenen Sternen bei etwa $10^{-5} - 10^{-3}$ Sonnenmassen/Jahr liegt.

Die blauverschobene Absorption wird durch den Teil des Windes erzeugt, der genau vor der Sternscheibe liegt und auf uns zu fliegt, während die im Mittel unverschobene Emission aus der gesamten, in alle Richtungen strömenden Windmaterie stammt. Die dominante Emissionslinie $H\alpha$ des neutralen Wasserstoffs bei 6563 \AA , sowie die benachbarte Emissionslinie des neutralen Heliums bei 6678 \AA sind zwei spektrale Merkmale, an denen einige typische Wesenszüge dieser Sterntypen studiert werden können. Abb. 3 zeigt zunächst einen Überblick über die bekannte enorme Variabilität der EW der $H\alpha$ -Emission seit den ersten verfügbaren Daten von Scuderi von Juli 1988 [3].

Unser Monitoring beginnt im Mai 1994, wobei inzwischen acht weitere Amateure mit ihren Spektren hinzugekommen sind. Dies ist ein wundervolles Beispiel einer internationalen Zusammenarbeit von Beobachtern aus Frankreich, der Schweiz, Italien, Spanien, Deutschland und Japan, wobei dieser die Zeitspanne von 22 Jahren umfassende Datensatz erstmals eine Periodenanalyse erlaubt (Abb. 4). Die oft diskutierte Periode (des visuellen Lichtwechsels!) von 1300 Tagen konnte auch hier im Periodogramm der $H\alpha$ -EW (Abb. 4 oben) mit einem Wert von 1211 Tagen bestätigt

werden. Bei den kleineren angedeuteten Perioden handelt es sich um sog. Alias-Perioden, Scheinperioden die durch Samplingeffekte hervorgerufen werden.

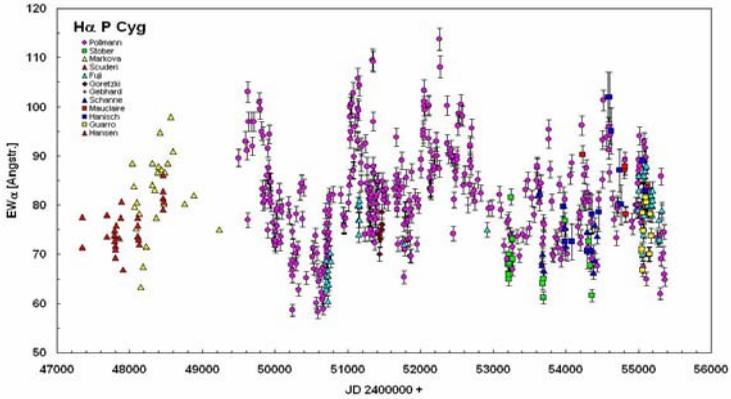


Abb. 3: Variabilität der H α -Äquivalentbreite des Zeitraumes Juli 1988 bis heute (22 Jahre)

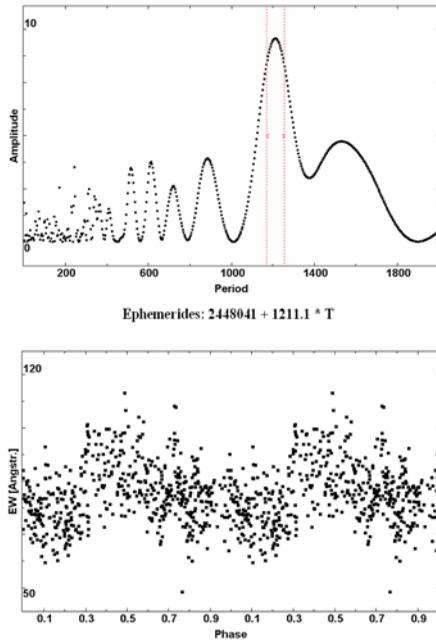


Abb. 4: Periodenanalyse (oben) und Phasenverhalten (unten) der H α -Äquivalentbreite

Innerhalb des Gemeinschaftsprojektes mit inzwischen 10 photometrischen Beobachtern der amerikanischen Organisation für Veränderliche Sterne AAVSO wird nun einerseits primär versucht, die Untersuchungen von Markova et al. [2] zur Anti-Korrelation zwischen der H α -EW und der photometrischen V-Helligkeit fortzusetzen, um aber auch andererseits darüber hinaus Informationen über den intrinsischen, d. h. vom Stern selbst herrührenden Linienfluss zu erhalten.

Ein direkter Vergleich photometrischer und spektroskopischer Daten legte in den Untersuchungen von Markova et al. [2] die Existenz einer engen Beziehung zwischen den Variabilitäten der H α -EW und V in dem Sinne offen, dass wenn die H α -EW abnimmt, der Stern in V heller wird und umgekehrt (Abb. 5).

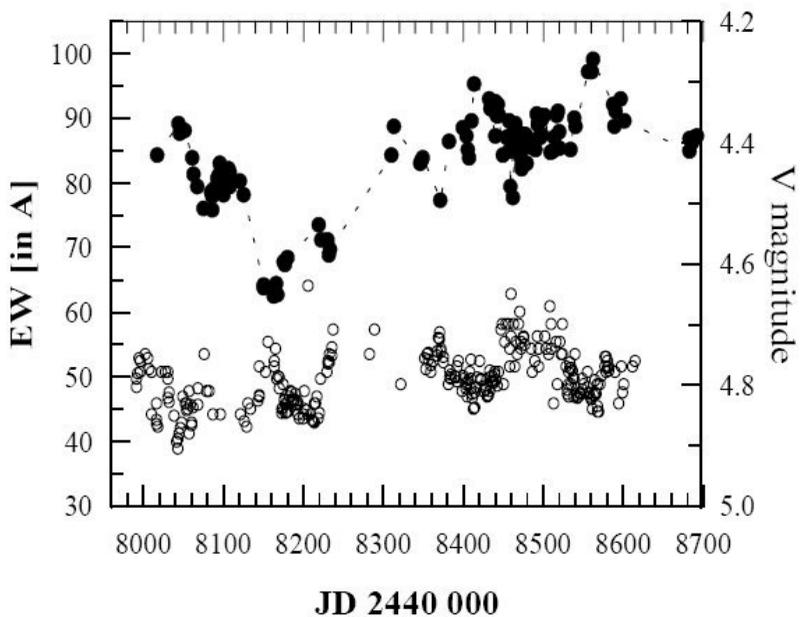


Abb. 5: Photometrische V-Variation und Variation der H α -EW nach Markova [2]. Eindeutig ist das umgekehrte Verhalten beider Größen zueinander zu erkennen

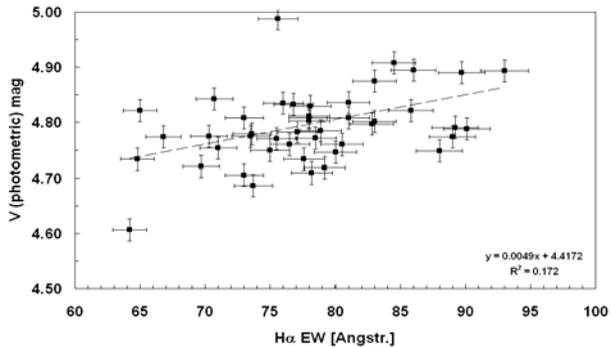
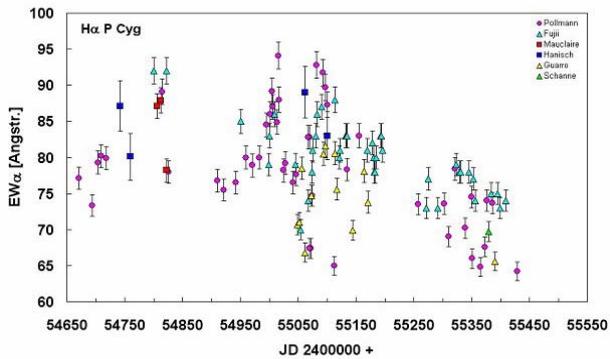
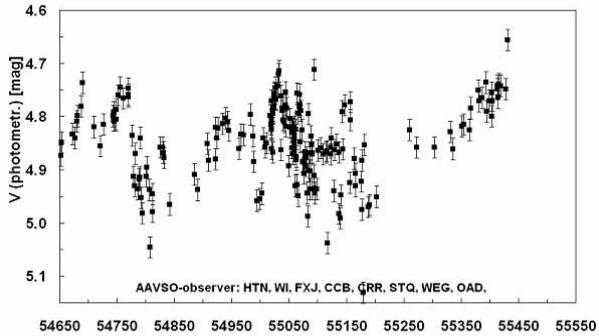


Abb. 6: Die Anti-Korrelation unserer bisherigen Kampagne seit November 2008 zeigt in Analogie zu den Ergebnissen von Markova [2] eine sehr gute Übereinstimmung.

Die in dieser Untersuchung dargelegte Anti-Korrelation legt die Vermutung nahe, dass die beobachteten Variabilitäten der H α -Äquivalentbreite eher durch Veränderungen des photosphärischen Kontinuums, als durch nennenswerte Veränderung der Winddichte verursacht werden.

Aus diesem Grunde ist der Einfluss von Kontinuumsänderungen zu berücksichtigen, wenn Studien über Eigenschaften des Windes und im Besonderen Eigenschaften der Massenverlustrate durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass in den Untersuchungen von Markova [2] V-Helligkeiten und EW's oftmals mit einer Zeitdifferenz von einigen Tagen gegenübergestellt wurden.

Die Anti-Korrelation der H α -Äquivalentbreite zur V-Helligkeit unserer Kampagne in Abb. 6 zeigt im Vergleich mit den Ergebnissen von Markova [2] eine sehr gute Übereinstimmung (Zeitdifferenz zwischen den V- und EW-Messungen nicht größer als 6-8 Std.). Im unteren Plot von Abb. 6 erscheint diese Anti-Korrelation etwas anschaulicher. Der Korrelationskoeffizient von nur 0.17 deutet aber bereits darauf hin, dass in der H α -EW noch ein intrinsischer Beitrag als Variable enthalten ist.

Eine Anti-Korrelation ist zu erwarten, wenn die Variation des Kontinuums und des Linienflusses von einander unabhängig sind. Wenn etwa der Fluss in der Linie konstant ist, ergibt z. B. eine Erhöhung des Kontinuums wegen der Normierung der EW auf das Kontinuum automatisch eine geringere EW und umgekehrt. Um nun zu sehen, ob und wie der absolute Linienfluss, welcher aus der EW durch entfernen der Kontinuumsnormierung erhalten werden kann, variiert, wird die gemessene EW für diesen Effekt korrigiert.

Aus der Definition der EW ($EW = \text{Fluss}/\text{Kontinuum}$) und der Definition der Größenklassen ergibt sich der Linienfluss $F = EW / 10^{(0.4 \cdot V_{\text{phot}})}$. Zur Korrektur der Kontinuumsvariationen wird die gemessene EW durch $10^{(0.4 \cdot V_{\text{phot}})}$ dividiert. Die Beobachtung des absoluten Linienflusses ist deshalb von Bedeutung, weil die intrinsischen Variationen auf eine variable Massenverlustrate, Variationen der Winddichte (und Windgeschwindigkeiten?) sowie Änderungen der Ionisationsstruktur zurückzuführen sind.

Dieses Gemeinschaftsprojekt wird erfreulicherweise kontinuierlich, photometrisch wie spektroskopisch von einer inzwischen weiter gestiegenen Anzahl von Beobachtern [1] mit Messdaten gefüttert, so dass der inzwischen vorliegende Datensatz erneut eine Zwischenbilanz ermöglicht. So konnten bis heute 46 echte zeitgleiche Messungen des Linienflusses und V_{phot} zusammengefasst werden.

Abb.7 ist der Versuch, herauszufinden, ob und inwieweit der intrinsische Linienfluss (als kontinuumskorrigierte EW) von V_{phot} abhängt. Aus statistischer Sicht kann man sagen, dass die mathematische Korrelation mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,12$ (das nach der hier vorgenommenen Kontinuumskorrektur theoretisch den Wert Null haben sollte) unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten den Schluss zulässt, dass der Linienfluss in H α von V_{phot} unabhängig zu sein scheint und womit bestätigt würde, dass die nicht korrigierten EW-Variationen (bei nahezu) konstantem Fluss vorwiegend

durch Änderungen in V verursacht werden, was als Anti-Korrelation von EW und V_{phot} in Abb.5 und 6 zum Ausdruck kommt.

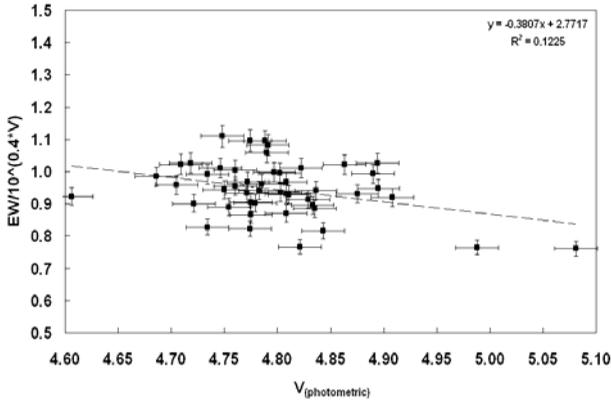


Abb. 7: Bisherige Messungen der Kampagne zeigen: Kontinuumsvariationen $V(\text{photom.})$ und des intrinsischen Linienflusses sind unabhängig voneinander

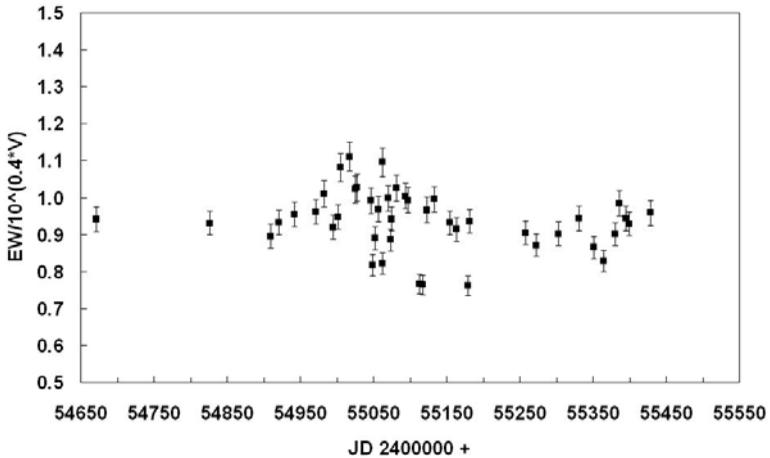


Abb. 8: Der intrinsische H α -Linienfluss innerhalb des bisherigen Beobachtungszeitraumes November 2008 bis heute

Trägt man den intrinsischen H α -Linienfluss gegen die Zeit auf (Abb. 8), so zeigt sich, dass dieser auf mehr oder weniger gleich bleibendem Niveau liegt. Die darin zutage tretenden intrinsischen Variationen sind auf Änderungen der Massenverlustrate,

Änderungen in der Winddichte und Änderungen in der Ionisationsstruktur zurückzuführen.

Diese bisherigen 46 zeitgleichen EW- und V-Messungen der Kampagne sind bei weitem nicht ausreichend, um statistisch gesicherte Aussagen zum simultanen Zeitverhalten von V und intrinsischem Linienfluss F zu treffen. Dazu bedarf es weiterer, mehrjähriger, zeitgleicher spektroskopischer Beobachtungen sowie hochgenauer photometrischer Helligkeitsmessungen.

Nach Markova et al. [2] ist der Wind in P Cyg wahrscheinlich ausreichend optisch dick zur Bildung einer permanenten „Pseudo-Photosphäre“, weshalb Änderungen der visuellen Helligkeit in der Größenordnung 0,2 mag vermutlich auf Variabilitäten der Massenverlustrate zurückzuführen sind. Massenverluständerungen sollten sich außer in der EW der H α -Emission auch in ihrer blauseitigen Absorptionskomponente manifestieren. Die blauseitige Absorption in H α ist jedoch so stark aufgefüllt bzw. gesättigt, dass selbst starke Variationen der Massenverlustrate die Absorptionsstärke nur wenig verändern. Da man wegen der hohen Winddichte bei P Cyg eigentlich keine statische Photosphäre des Sterns sieht, reagiert die blauseitige Absorption der HeI6678-Linie wegen der geringeren optischen Dicke in den Heliumbildenden Zonen viel empfindlicher auf Massenverlustvariationen. Die EW der H α -Emission misst im Wesentlichen die gesamte Masse der Hülle, wogegen die EW der HeI6678-Absorption aus Sicht des Beobachters nur die Masse vor dem Stern erfasst. Als Indikator für photosphärischen Massenverlust ist darum in Abb. 9 die EW der HeI6678-Absorption in ihrem Zeitverhalten dargestellt.

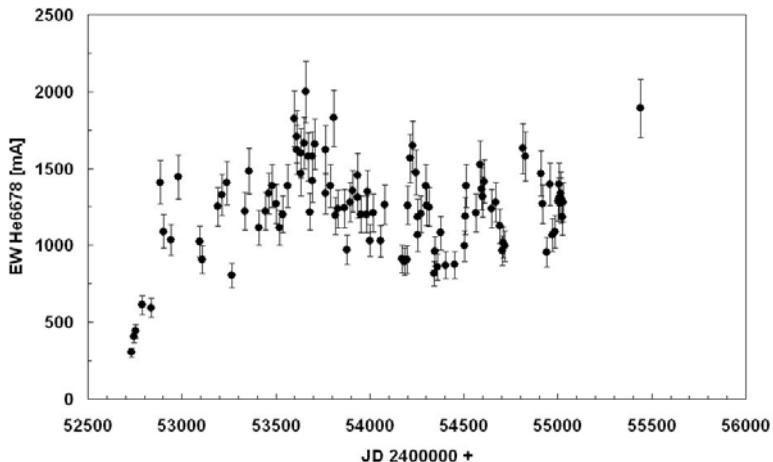


Abb. 9: Zeitverhalten der EW der HeI6678- Absorption

Das seit April 2003 immerhin während 6 Jahren durchgeführte Monitoring deutet darauf hin, dass sie beachtlichen Variabilitäten unterliegt, die vermutlich in Änderungen der Massenverlustrate begründet sind. In diesem Monitoring ist jedoch zu

beachten, dass 1. die EW der He6678-Absorption nur schwer zu bestimmen ist und mit einem relativ großen Messfehler der Größenordnung (\pm) 10% behaftet ist und 2., dass die Absorption neben dem Massenverlust auch noch stark von der Temperatur- und Ionisationsstruktur des Sternwindes abhängt.

Interessant wäre darauf hinzuweisen, dass einige supermassive Sterne sich anscheinend als Objekte von Mehrfachsternentstehung erwiesen haben [4], wie etwa im Fall η Car oder HD 32228 [5] und dass die Ursachen der regelmäßigen oder unregelmäßigen photometrischen Veränderungen nicht nur als Ausbrüche wegen des Ungleichgewichtes und in der Sternaktivität zu verstehen sind. Es gibt zusätzliche mögliche Effekte, wie etwa Begleitersterne oder Verfinsterungen von rotierendem Material, wie dunklen Wolken oder helle Knoten in der äußeren Sternhülle, oder emittierendes Material des Sternes selbst. So wäre es eine gute Idee, künftige photometrische Beobachtungen auf Mehrfarbenphotometrie zu erweitern, um die Variabilität in mehr als nur einem Farbband zu studieren.

Literatur:

- [1] Markova, N.; P Cygni 2000, 400 Years of Progress; ASP Conference Series, Vol. 233, 2001
- [2] Markova, N; Morrison, N; Kolka, I; Markov, H; (2001) A&A 376, 898-906
- [3] Scuderi et al., The Astrophysical Journal, 437, 465-475, 1994
- [4] Weigelt, G., Ebersberger, J. 1986, A&A, 163, L5
- [5] Bauer, T.; Weghorn, H.; Grebel, E. K.; Bomans, D. J., 1996, A&A, 305, pp.135

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich für Bereitstellung von Spektren und Messdaten bei den folgenden, am Projekt beteiligten Beobachtern:

AAVSO (V_{phot}):

Adrian Ormsby
Robert E. Crumrine
Jim Fox
Kate Hutton
Nick Stoikidis
David Williams
E. G. Williams
Charles L. Calia
Thomas L. Peairs
Jeffery G. Horne

Spektroskopie-Gruppe (Ha-EW)

Mitsugu Fuji (Japan)
Benjamin Maucclair (France)
Joan Gurro (Spain)
Bernd Hanisch (Germany)
Lothar Schanne (Germany)