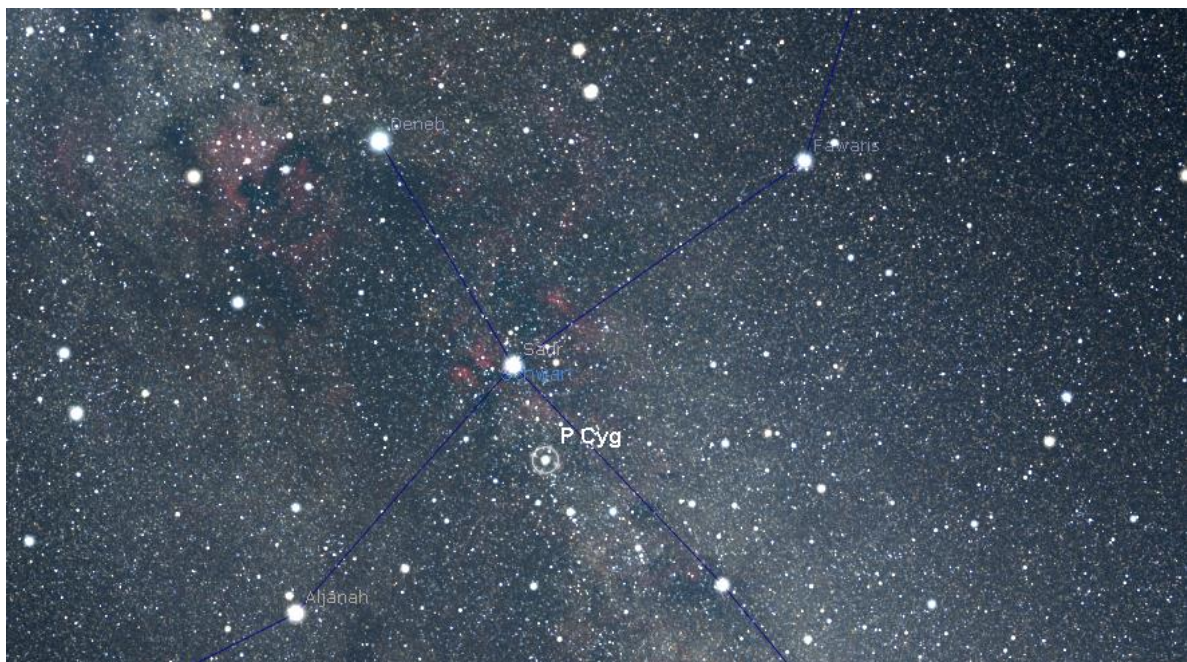
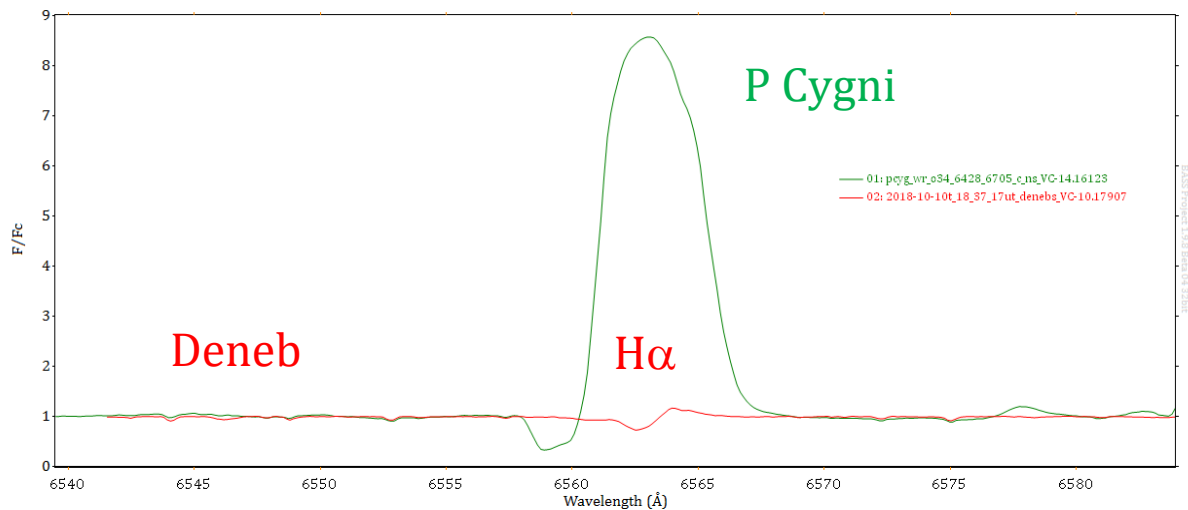


Spektroskopische Vermessung der Sternwinde der LBV-Sterne Deneb und P Cygni



Juliane Neußer und Moritz van Eimern

Carl-Fuhlrott-Gymnasium, Jung-Stilling-Weg 45, 42349 Wuppertal

Jugend forscht 2019

Kurzzusammenfassung

Die Sterne P Cygni und Deneb (α Cygni) gehören zur Klasse der Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen (kurz LBV) Sterne. Die Besonderheit dieser Sternklasse spiegelt sich in ihren stark variierenden Sternwinden wieder, die im Zentrum unserer spektroskopischen Forschungsarbeit liegen.

Pulsationen solcher Sterntypen verursachen wahrnehmbare Änderungen, die sich in Helligkeitsvariationen und in Änderungen der Expansionsgeschwindigkeit der Sternwinde ausdrücken.

Die ungewöhnlichen Zustände treten nur sehr selten und unregelmäßig auf, was beide Sterne und insbesondere Deneb zu einem besonders interessanten Forschungsprojekt macht. Im Vergleich zu älteren Spektren von Deneb, die bis zu drei Jahre zurückgehen, wurde das gegenwärtige Verhalten untersucht.

P Cygni hingegen ist der Prototyp der LBV-Sterne und weist ein charakteristisch stark ausgeprägtes H α -Emissionsprofil, das sog. P-Cygni-Profil auf, welches aufgrund seiner starken Ausprägung einen hervorstechenden Kontrast zu anderen P-Cygni-Profilen, wie jenem von Deneb, aufweist.

Mithilfe eines Verfahrens der hochauflösenden Spektroskopie analysieren wir in zeitlicher Abhängigkeit beide Sterne und stellen Hypothesen und Deutungen über das Verhalten der Sternwinde auf. Im Zentrum unserer Entdeckungen steht die H α -Emissionslinie und die durch diese Linie ermittelten Parameter, anhand derer wir die Änderung der Sternwinde vermessen und ihr Verhalten entschlüsseln können.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Methode.....	2
2.2 Hertzsprung-Russell-Diagramm.....	3
2.3 LBV-Sterne	4
2.3.1 Deneb (α Cygni)	4
2.3.2 P Cygni	4
2.4 Entstehung des P-Cygni-Profiles	5
3. Arbeitshypothese	5
4. Vorgehensweise	6
4.1 Aufnahme	6
4.2 Bearbeitung	8
5. Ergebnisse	9
5.1 Deneb	9
5.2 Vergleich von Deneb und P Cygni	11
6. Fazit.....	14
7. Danksagung.....	14
8. Abschlusserklärung	14

1. Einleitung

Die von uns im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten Sterne P Cygni und Deneb befinden sich beide im Sternbild Schwan und besitzen als Angehörige der seltenen Klasse der Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen Sterne stark variierende Sternwinde. Diese werden durch Pulsationen und Eruptionen in der Sternhülle hervorgerufen.

Die ersten Beobachtungen und Analysen des Sterns Deneb und seiner Sternwinde wurden mithilfe von Photometrie und Messungen der radialen Geschwindigkeiten von Fath (1935) und Paddock (1935) durchgeführt. Die ersten Studien zu Schwingungen in der Sternatmosphäre erfolgten von Abt (1957), gefolgt von einer Schwingungsanalyse durch Lucy (1976), die aufzeigt, dass solche in der Atmosphäre vorhanden waren. In folgenden Jahren wurden weitere spektroskopische Beobachtungen von Deneb vorgenommen, wobei von Parthasarathy & Lambert (1987) eben jene Geschwindigkeitsvariationen wie von Paddock beobachtet und von Lucy analysiert, bestätigt wurden.

In den Jahren 1996 und 1997 untersuchten Kaufer et al. die Variationen der Geschwindigkeit und des P-Cygni-Profils, wodurch sich zeigen ließ, dass solche Ereignisse mit starken Variationen periodisch auftreten. Im Kontrast hierzu fanden Morrison & Mulliss (1998) heraus, dass es oft Absorptionsereignisse gebe, in denen ein sekundärer Absorptionsbestandteil im blauverschobenen Teil des Absorptionsbestands des $H\alpha$ -Profils zu finden ist. Zwar war bereits lange bekannt, dass die Stärke der $H\alpha$ -Emission in Beziehung zur Leuchtkraft steht, allerdings wurde diese Information erst von Kudritzki (1999) und Kudritzki et al. (1999) für die von ihnen entwickelte „wind momentum–luminosity relationship“ (WLR) Methode genutzt, mit der große Entfernungen wie solche zu Deneb oder P Cygni präziser als zuvor gemessen werden können. Weiterhin gehört zu den wichtigsten Komponenten dieser Sterne die Variationen im $H\alpha$ -Profil. Insofern diese sich wiederholen, stehen sie möglicherweise in Relation zur Rotationsperiode des Sterns (Cranmer & Owocki 1996). Weitere Studien, die sich mit den Variationen des $H\alpha$ -Profils befassen, könnten Hinweise auf die physischen Mechanismen geben, die diese hervorrufen (z.B., Maeder 1980).²

Deneb ist zurzeit der am besten studierte Überriese der Spektralklasse A. Trotz der bahnbrechenden Atmosphärenmodelle von Groth (1961) und der neusten Studien von Aufdenberg, et al. (2002) lässt sich allerdings keine Übereinstimmung bezüglich der atmosphärischen Parameter und des Vorkommens chemischer Elemente nachweisen. So reichen beispielsweise die bisher gemessenen Temperaturen des Sterns von 7635K (Blackwell et al. 1980) bis zu 10080K (Burnashev 1980). Anhand von Nahinfrarotspektroskopie konnte kürzlich von F. Schiller and N. Przybilla (2018) eine detaillierte Analyse des Atmosphärenmodells erstellt werden. Diese impliziert nähere Werte und eine Weiterentwicklung Denebs zum Roten Überriesen.³

Im Vergleich zu Deneb besitzt P Cygni als Prototyp der LBV-Sterne (Conti 1984) auffällige zeitliche Schwankungen und außergewöhnlich starke Emissionslinien in seinen Linienprofilen (Lamers 1986). Bereits im Jahr 1929 war bekannt, dass die P-Cygni-Profile von Sternen aus einer sich auseinanderbewegenden Hülle bestehen (McCrea und Beals). Zwar wurde ihm viel Aufmerksamkeit von sowohl Beobachtern und Theoretikern zuteil (Davidson 1986, de Groot und Lamers 1992, Stahl et al. 1995), allerdings wurden bisher fast nur photometrische und spektroskopische Analysen durchgeführt. Durch Langbasisinterferometrie oder Adaptive Optik (de Vos 1992, Nishimoto et al. 1994) könnten, wenn gleichzeitig hochauflösende spektroskopische Untersuchungen vorgenommen würden, die physikalischen Theorien bzgl. des Sternwindes von P Cygni eingeschränkt werden (Burgin und Chalabaev 1992). Zudem könnten so weitere Aussagen über P Cygnis Eigenschaften und seinen Wind getroffen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Analyse von P Cygni besteht im Abgleich von Modell und Beobachtung

² A Five-year Spectroscopic and Photometric Campaign on the Prototypical α Cygni Variable and A-type Supergiant Star Deneb; N. D. Richardson¹, N. D. Morrison², E. E. Kryukova², S. J. Adelman³

³ Quantitative spectroscopy of Deneb; F. Schiller and N. Przybilla; Dr. Remeis-Sternwarte Bamberg, Sternwartstr. 7, D-96049 Bamberg, Germany; Astronomy & Astrophysics manuscript no. Deneb`paper c ESO 2018, October 30, 2018

der Veränderlichkeit des Sternwindes (Lamers und Morton 1976 und Lamers und Rogerson 1978). Hierdurch können weitere Theorien über den Sternwind und sein Verhalten entwickelt werden.⁴⁵

In Bezug auf beide Sterne lässt sich bestätigen, dass blaue Überriesen, die die oben genannten Eigenschaften aufweisen, nicht so intensiv erforscht werden, wie es heute technisch möglich wäre.

In unserer Forschungsarbeit geht es um die hochauflösende spektroskopische Beobachtung und Auswertung von Sternspektren beider LBV-Sterne. Diese wurden von uns an der Sternwarte unserer Schule, dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium in Wuppertal, durchgeführt. Mithilfe einiger Rohspektren (unbearbeitete Aufnahmen) unseres Forschungsleiters Bernd Koch konnte eine Langzeitbeobachtung mit Aufnahmen von 2014 bis 2018 erstellt werden. Somit können auch wir als Amateurastronomen einen Teil zur Erforschung der Sternwinde von LBV-Sternen beitragen, da besonders dieses Feld der Astronomie noch weiter bestellt werden sollte.

Doch wie kamen wir auf diese Themenwahl? Nachdem wir im Projektkurs unserer Schule erfuhren, dass es „Winde“ im Weltall gibt, war unser Interesse geweckt. Hinzu kam die neu gewonnenen Kenntnisse zur Sternspektroskopie und die Faszination, dass nur mithilfe des empfangenen Sternlichts der Stern und besonders der Sternwind beobachtet und erforscht werden kann. Das, was unsere Neugier an diesem Thema besonders erregte, war die Chance, selbst eine der seltenen Eruptionen und Veränderungen des Sternwindes zu entdecken, da diese nur sehr unregelmäßig auftreten. Da dieser Bereich der LBV-Sternforschung eben noch nicht gänzlich erforscht ist, fand sich zudem der Anreiz, selbst auf die aktuelle Forschung mit einwirken zu können. Ein weiterer Grund dieses Thema zu untersuchen fand sich in der 5-Jahres-Beobachtung von N. D. Richardson, N. D. Morrison, E. E. Kryukova und S. J. Adelman, (2010), welche im Rahmen dieser Kampagne ein äußerst auffälliges „High-velocity absorption“ Event im Jahr 2001 beobachten konnten. Hierbei verschwand die Emission im P-Cygni-Profil von Deneb fast gänzlich und die dort gemessenen Werte erreichten ein noch nie gemessenes Minimum. Diese Periode dauerte ca. 40 Tage, wie bereits eine ähnliche, die Jahrzehnte zuvor stattfand. Das gleiche Ereignis zeigte im weiteren Verlauf eine nie dagewesene ausgeprägte Absorption.

Daraus entwickelte sich nun unsere Frage, ob und wann in den letzten Jahren speziell solche Ereignisse stattgefunden hatten. Sind diese folglich öfter als in den letzten Jahrzehnten eingetreten oder hat sich der Stern ruhig verhalten? Hinzu kam die Neugier, herauszufinden, warum ausgerechnet P Cygni der Prototyp der LBV-Sterne ist und was diesen so besonders macht. Hinsichtlich dieser Fragestellung entwickeln wir zusätzlich einen Vergleich mithilfe aller gesammelten Messdaten. Anhand der entwickelten Ergebnisse können wir nun Aussagen und mögliche Antworten zu der oben genannten Fragestellung treffen/finden.

2. Methode

2.1 Spektralklassen

Die Spektralklassifikation teilt Sternen eine Spektralklasse und eine Leuchtkraftklasse zu. Sie dient zur Einordnung der Sternspektren in Kategorien. Sterne einer Kategorie haben sehr ähnliche Eigenschaften. Die heute allgemein anerkannte Klassifikation wurde an der Harvard-University in Cambridge (Massachusetts / USA) entworfen und wird daher auch Harvard-Klassifikation genannt. Sie ordnet alle Sterne in die Spektralklassen O, B, A, F, G, K, M ein, welche nochmal in Stufen von 0-9 geteilt wurden. Die Spektralklasse bestimmt z. B. die Oberflächentemperatur. Zusätzlich wird immer auch die Leuchtkraftklasse angegeben. Diese wird mit den Römischen Zahlen Ia, Ib, II, III, IV, V, VI und VII dargestellt. Die Leuchtkraft eines Sterns wird von seiner Masse bestimmt, wobei Ia einen massereichen Stern bezeichnet. Die Sonne hat die Spektralklasse G2V, sie ist also ein kleiner Stern mit einer vergleichsweise niedrigen Oberflächentemperatur.

⁴ AN ATLAS OF THEORETICAL P CYGNI PROFILES; John I. Castor and Henny J. G. L. M. Lamers*
Joint Institute for Laboratory Astrophysics, National Bureau of Standards and University of Colorado
Received 1978 July 14; accepted 1978 October 4

⁵ Subtle structures in the wind of P Cygni; F. Vakili, D. Mourard, D. Bonneau, F. Morand, and Ph. Stee
Observatoire de la Cote d’Azur, Departement Fresnel, CNRS URA 1361, G12T, F-06460 Saint Vallier de Thiey, France; Received 16 October 1996 / Accepted 18 December 1996

2.2 Hertzsprung-Russell-Diagramm

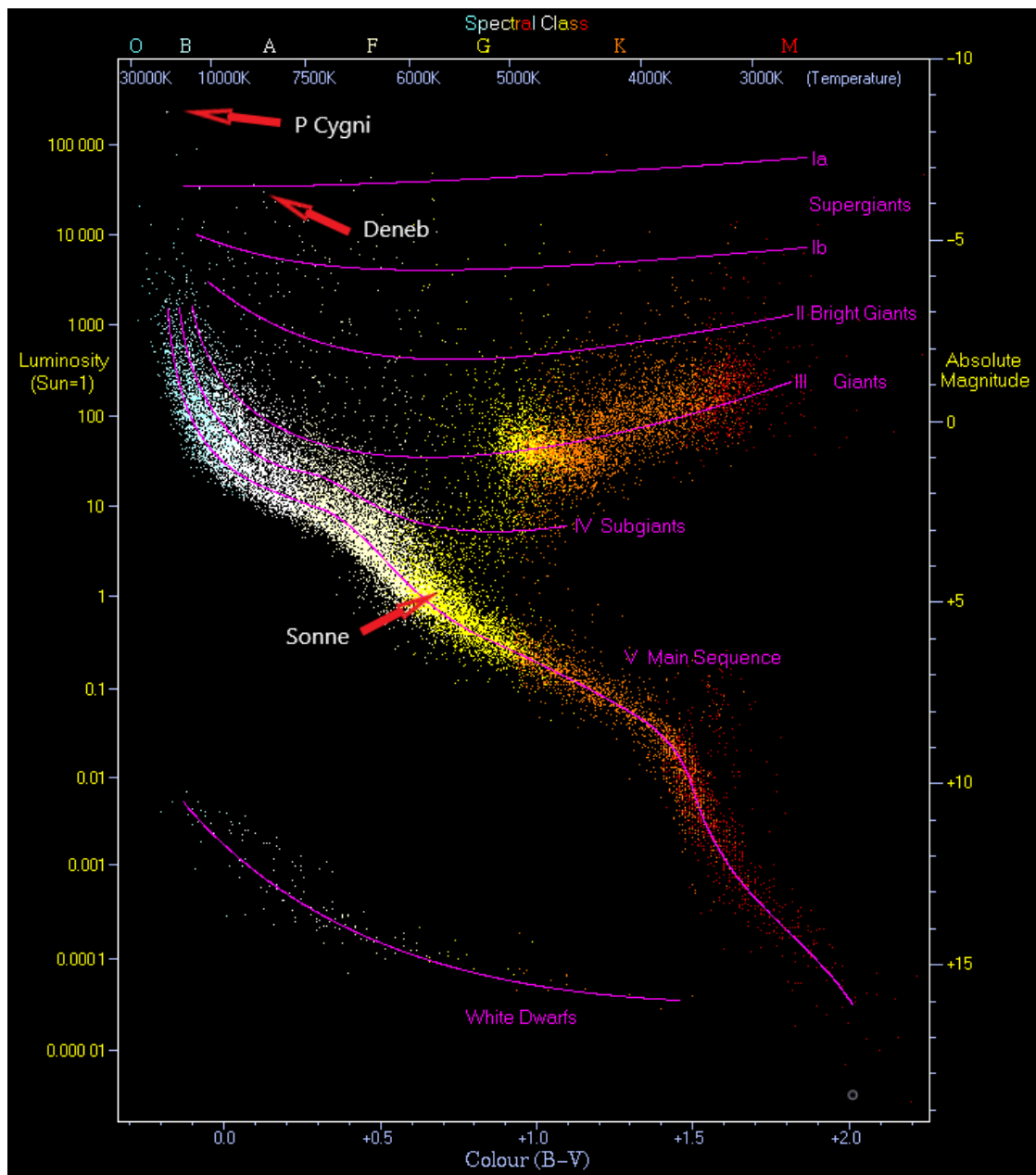


Abbildung 1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit P Cygni, Deneb und der Sonne (rote Pfeile)⁶

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (kurz HRD), benannt nach Ejnar Hertzsprung und Henry Norris Russell, ist ein Diagramm, in dem die meisten bekannten Sterne nach Oberflächentemperatur bzw. der Spektralklasse und nach ihrer Leuchtkraft (eng.: luminosity) eingetragen sind. Die horizontale Achse zeigt die Oberflächentemperatur und damit auch die Spektralklasse (oben im Diagramm). Auf der vertikalen Achse ist links im Diagramm die Leuchtkraft in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft aufgetragen. Die absolute Helligkeit wurde rechts passend ergänzt.

⁶ Abbildung: Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram; durch Autoren bearbeitet

2.3 LBV-Sterne

Die von uns beobachteten Sterne Deneb und P Cygni gehören zu der besonderen und seltenen Sternklasse der Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen (kurz LBV). Sie gehören zur Sterngruppe der Überriesen (siehe Abb. 1 „Supergiants“). Aufgrund ihrer hohen Oberflächentemperatur von über 10000K erscheinen uns diese Sterne in einer bläulichen Farbe.

Die besondere Eigenschaft der LBV Sterne liegt in ihrer veränderlichen Leuchtkraft. Diese Veränderungen können entstehen, wenn bei einem massereichen Stern, welcher von einer Gaswolke umgeben ist, das hydrostatische Gleichgewicht gestört ist. Dabei baut sich im Stern immer mehr Druck auf, der dann impulsartig entladen wird. Daraus resultieren Pulsationen des Sterns und starke Sternwinde. Diese Änderungen können je nach Beschaffenheit des Sterns sowohl zyklisch als auch unregelmäßig vorkommen.

2.3.1 Deneb (α Cygni)

Deneb ist als blauer Überriese der scheinbar hellste Stern im Sternbild Schwan. Er befindet sich ca. 800pc (Schiller 2018) entfernt von der Erde und bildet zusammen mit den Sternen Wega und Altair das Sommerdreieck.

Deneb ist ein Stern der Spektralklasse A2, Leuchtkraftklasse Ia, mit einer Effektivtemperatur von 8525K. Seine absolute Helligkeit beträgt $-8,49$ mag, das entspricht ungefähr der 180-fachen Sonnenleuchtkraft. Sein Radius umfasst ca. 200 Sonnenradien, während seine Masse schätzungsweise der 20-fachen der Sonnenmasse entspricht.

2.3.2 P Cygni

P Cygni ist ebenfalls ein LBV-Stern und befindet sich im Herzen des Sternbildes Schwan. Seine Entfernung zur Erde beträgt ca. 1700pc. P Cygni gehört zu den hellsten Sternen am Nachthimmel, ist jedoch aufgrund der Gaswolke um ihn herum nicht immer als solcher zu sehen. Seine absolute Helligkeit übertrifft nach Messungen von 2007 mit bis $-7,70$ mag die der Sonne um ca. das 100.000-fache. Er gehört zur Leuchtkraftklasse Ia-0 und wird mit einer Temperatur von 18000K der Spektralklasse B1 zugeordnet. Mit seiner Masse von 30 bis 60 Sonnenmassen ($M_{\odot}$) ist er massereicher als Deneb aber dennoch mit einem Radius von etwa 76 Sonnenradien ($R_{\odot}$) kleiner als Deneb.

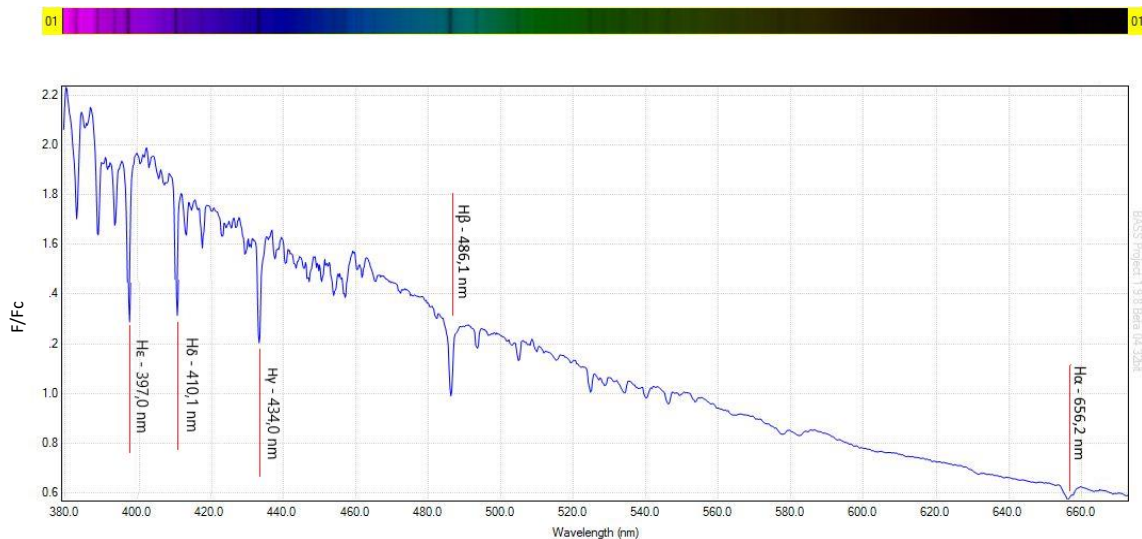


Abbildung 2: Übersichtsspektrum eines LBV-Sterns Deneb im Sternbild Schwan. Das Spektrum wurde von den Autoren aufgenommen.

P Cygni ist der Namensgeber dieses markanten Spektralprofils. Aus der Untersuchung eines solchen Profils kann man über das veränderliche Verhalten des untersuchten Sterns Rückschlüsse treffen. Abbildung 2 zeigt ein eigens angefertigtes Gesamtspektrum des Sterns Deneb im Bereich des sichtbaren Lichts, aufgenommen mit einem DA-DOS Spaltspektrographen. Das Spektrum von P Cygni sieht diesem sehr ähnlich. Dabei ist die Balmer-Serie, verursacht durch den großen Anteil des Wasserstoffs in der Sternhülle, sehr auffällig. Zusätzlich erkennt man, dass im blauen Bereich die Intensität des Sterns deutlich zunimmt, was auf seine hohe Temperatur zurückzuführen ist. Für die Untersuchung des P Cygni Profils sucht man sich eine markante Linie heraus und nimmt ein feineres Spektrum dieser Linie auf, um ein bestmögliches Endergebnis zu erbringen.

2.4 Entstehung des P-Cygni-Profiles

Typisch für LBV-Sterne ist das sogenannte P-Cygni-Profil ihrer Spektrallinien, welches wir bei der $H\alpha$ -Linie (bei $6562,8\text{\AA}$) zeitabhängig untersucht haben. Das Profil ergibt sich aus der Existenz eines Sternwindes.

Das P-Cygni-Profil setzt sich aus einem verbreiterten, unverschobenen Emissionsanteil und einem blauverschobenen Absorptionsanteil zusammen. Das Sender-Empfänger-Prinzip des Doppler-Effekts erklärt dieses Phänomen. Derjenige Teil des Sternwindes, welcher sich im Moment des Beobachtens auf den Empfänger hinbewegt, erzeugt die Blauverschiebung. Jener Teil, der sich wegbewegt, erwirkt eine Rotverschiebung. Der Bereich des Sternwindes, der sich auf den Betrachter hinbewegt, erzeugt eine blauverschobene Absorption. An dieser Stelle wird das Licht durch die umliegende Hülle absorbiert, daraufhin remittiert und der blauverschobene Bereich entsteht. Der hintere Teil des Windes liegt in dem Betrachter abgewandten Bereich und veranlasst die gegenteilige Wirkung im Spektrum, nämlich einen „Übergang“ zur Rotverschiebung und Emission. Dieser Teil entfernt sich dementsprechend am schnellsten vom Betrachter. Die kleinere Frequenz entspricht einer höheren Wellenlänge.

Bei Deneb ist davon auszugehen, dass der Sternwind größtenteils aus einer Wasserstoffhülle besteht, da sich nur bei der Wasserstofflinie $H\alpha$ ($6562,852\text{\AA}$) ein ausgeprägtes P-Cygni-Profil ausbildet. Im Vergleich hierzu besitzt P Cygni mehrere Spektrallinien, die ein solches Profil aufweisen. Das stärkste befindet sich jedoch bei $H\alpha$, bei der davon ausgegangen wird, dass die damit verbundenen Teile des Sternwindes sich im äußeren Bereich der Sternhülle befinden. Diese Spektrallinie hat vergleichsweise eine niedrigere Anregungsenergie. Folglich hat auch der Sternwind an dieser Stelle eine geringere Temperatur und Wellenlänge. Die energiereicheren Spektrallinien symbolisieren dementsprechend die weiter inneren Teile des Sternwindes bis hin zum Stern selbst.

Um vergleichbare Forschungsergebnisse erhalten zu können und die Veränderungen und Eruptionen genau untersuchen zu können, müssen wir mithilfe des erarbeiteten Spektrums und der bekannten Dopplerformel die Expansionsgeschwindigkeit des Sternwindes ausrechnen: $v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} * c$

An dieser Stelle reicht es aus, die Differenz zwischen der Wellenlänge des minimalen Absorptionswertes und der Wellenlänge des maximalen Emissionswertes zu bilden. Diese Differenz beschreibt $\Delta\lambda$ (Abb. 3). Im nächsten Schritt wird diese durch die Ruhewellenlänge λ_s von $H\alpha = 6562,852\text{\AA}$ dividiert und daraufhin mit dem Wert der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert. Der errechnete Wert (in km/s) beschreibt nun die Endgeschwindigkeit des Sternwindes.

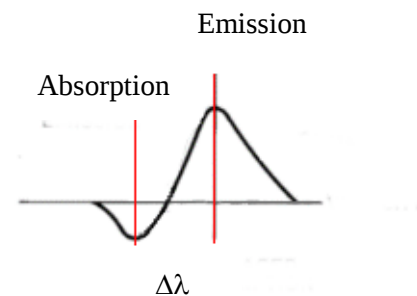


Abbildung 3: P Cygni Profil mit Emission und Absorption

3. Arbeitshypothese

In Hinblick auf die Berechnung der Geschwindigkeit des Sternwindes erwarten wir mehrfache, jedoch geringe Veränderungen bzgl. des Sternwindes von Deneb, da schwächere Pulsationen zur Eigenschaft des Sterns gehören. Anhand unserer Ergebnisse können wir daraufhin feststellen, ob womöglich auch größere Ereignisse wie z.B. „High-velocity absorption“-Ereignisse (HVA) stattgefunden haben. Im Weiteren werden unsere Ergebnisse uns ermöglichen, weitere Auskünfte und Vorhersagen über die Veränderung in längeren Zeiträumen zu treffen.

Zusätzlich ist ein starker Unterschied zwischen den P-Cygni-Profilen beider LBV-Sterne zu erwarten, da P Cygni, insofern sich sein Verhalten nicht geändert hat, ein wesentlich ausgeprägteres Profil an mehreren Spektrallinien aufweist und Deneb bekanntermaßen hauptsächlich bei $H\alpha$. Außerdem werden sich voraussichtlich deutliche Abweichungen in der Intensität der Emissionen ermitteln lassen.

Dies kann von uns bei der Ergebnissicherung in Hinblick auf die Geschwindigkeitsmessungen und die Äquivalenzbreite untersucht werden.

4. Vorgehensweise

4.1 Aufnahme

Für unser Projekt wurde uns die Sternwarte unserer Schule zur Verfügung gestellt, sowie einige zuvor aufgenommene Spektren unseres Projektbetreuers Bernd Koch an seiner privaten Sternwarte. Für die Aufnahmen wurde ein Corrected Dall-Kirkham (CDK 20) Teleskop in Kombination mit einem *DADOS* und zusätzlich einem *BACHES* (**B**asic **E**chelle Spectrograph) Spektrographen genutzt.⁷



Abbildung 5: Echelle Spektrograph und CCD-Kamera (rot) angebracht am CDK 20



Abbildung 4: DADOS Spektrograph mit angeschlossener CCD-Kamera (rot)



Abbildung 6: Teleskop CDK 20. Foto: Kevin Pixberg, Fabian Neußer

⁷ DADOS, CDK 20, BACHES Echelle: <https://www.baader-planetarium.de/>

Die Besonderheit des *BACHES* Echelle Spektrographen besteht darin, dass ein komplettes optisches Spektrum mit einem hohen spektralen Auflösungsvermögen von ca. 15000 erhalten wird⁸. Mithilfe eines zusätzlichen dispersiven Elementes (optisches Gitter oder Prisma) im Spektrographen werden die Ordnungen aufgeweitet, was besonders wichtig bei der Beobachtung von Phänomenen ist, die wie die Sternwind-Ausbrüche der LBV-Sterne, nur kurze Zeit auftreten. Der Spektralbereich, der aufgezeichnet wird, erstreckt sich von 392nm bis zu 800nm.

Der *DADOS* Spektrograph hat ein Reflexionsgitter mit einem spektralen Auflösungsvermögen von ca. 500. Dieser wird ebenso wie der Echelle Spektrograph an das CDK 20 angeschlossen. Zur Aufnahme verwenden wir eine hochauflösende monochrome CCD-Kamera (SBIG STF-8300M)⁹. Durch einen mechanischen Verschluss können wir hiermit auch Dunkelbildaufnahmen erstellen.

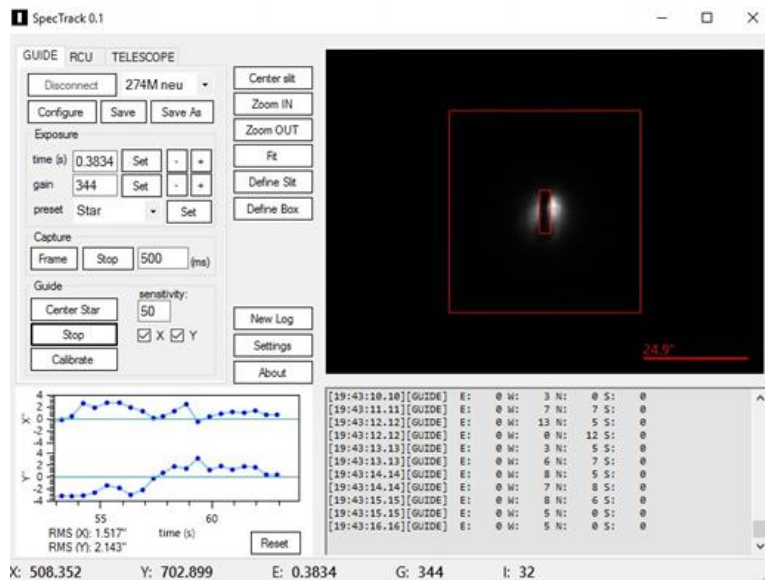


Abbildung 7: Guiding Software SpecTrack

rierung und einer Halogenlampe zur Ordnungs- und Staubererkennung der Spektren aufgenommen. Hierfür nutzen wir eine RCU (Remote Calibration Unit), die beide Lampen beinhaltet und über eine Glasfaserleitung mit dem Echelle-Spektrographen verbunden ist.

Im Folgenden sind die Reihenfolge sowie die Gesamtbelichtungszeiten aufgezeigt:

1. Referenzspektren der Halogenlampe (120s)
2. Referenzspektren der Thorium-Argon Lampe (60s)
3. Sternspektren P Cygni/ Deneb (60s/120s/300s)
4. Referenzspektren der Thorium-Argon Lampe (60s)
5. Referenzspektren der Halogenlampe (120s)

Die Variation der Belichtungszeit hat den Grund, dass die Wetterverhältnisse nicht zu jedem Zeitpunkt gleich sind und die Qualität des aufgenommenen Spektrums sich bei gleicher Belichtungszeit stark unterscheiden würde. Außerdem hat P Cygni eine geringere Leuchtkraft als Deneb, weswegen hier höhere Belichtungszeiten angesetzt wurden.

Äußere Temperatureinflüsse können außerdem für eine Veränderung der Aufnahmen während eines Aufnahme-prozesses führen, weswegen sowohl vor als auch nach der Sternspektrenaufnahme Referenzspektren erstellt werden, die im weiteren Verlauf gemittelt werden. Die bereits erwähnten Dunkel aufnehmen sind zum Ende des Prozesses aufzunehmen.

Um die Kamera nutzen zu können, muss diese vor Beginn der Aufnahmen auf ca. -15°C gekühlt werden. Außerdem muss sich das Teleskop der Außentemperatur in einiger Wartezeit anpassen und daraufhin mit Hilfe eines Keypads ausgerichtet werden (auf Deneb oder P Cygni). Das Guiding geschieht anhand der Software *SpecTrack*¹¹ (Abb.7). Jegliche Einstellungen sind durch Computersteuerung zu erreichen, da alle Programme miteinander verknüpft werden.

Sobald alles für den Aufnahme-prozess ausgelegt ist, werden in einer bestimmten Reihenfolge Sternspektren aber auch Referenzspektren einer Thorium-Argon Lampe zur Wellenlängenkalibrierung

⁸ BACHES Echelle Spektrograph: <https://www.baader-planetarium.com/en/baches-echelle-spectrograph.html>

⁹ CCD-Kamera (SBIG STF-8300M): <http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm>

¹⁰ SpecTrack: <https://www.baader-planetarium.com/en/software/spectrack-autoguiding-software-for-spectroscopy.html>

4.2 Bearbeitung

Bevor die Kalibrierung startet, werden die Referenzspektren in Windows mithilfe des Programms *Maxim DL* mit den ihren gemittelt und zur Weiterverarbeitung im von der ESO entwickelten Programm *MIDAS*¹² in *LINUX* abgespeichert. Danach wird ein Dunkelbildabzug von jedem Sternspektrum gemacht und diese werden daraufhin zu einem Summenbild addiert, da bei einer Mittelung Verfälschungen der Ergebnisse hervorgerufen durch Verschiebungen entstehen könnten.

Der Prozess der Kalibrierung beginnt damit, dass die Referenzspektren gescannt werden, um die spektralen Ordnungen zu erkennen und die Wellenlängen zu kalibrieren. Bei den erhaltenen Kalibrierungsparametern muss besondere Achtung auf die 34. Ordnung gelegt werden, da sich dort $H\alpha$ befindet. Dort sollte die mittlere Genauigkeit der Kalibrierung nicht weniger als $0.01\text{\AA}$ betragen. Mit den gesammelten Daten kann nun auch das Sternspektrum kalibriert werden

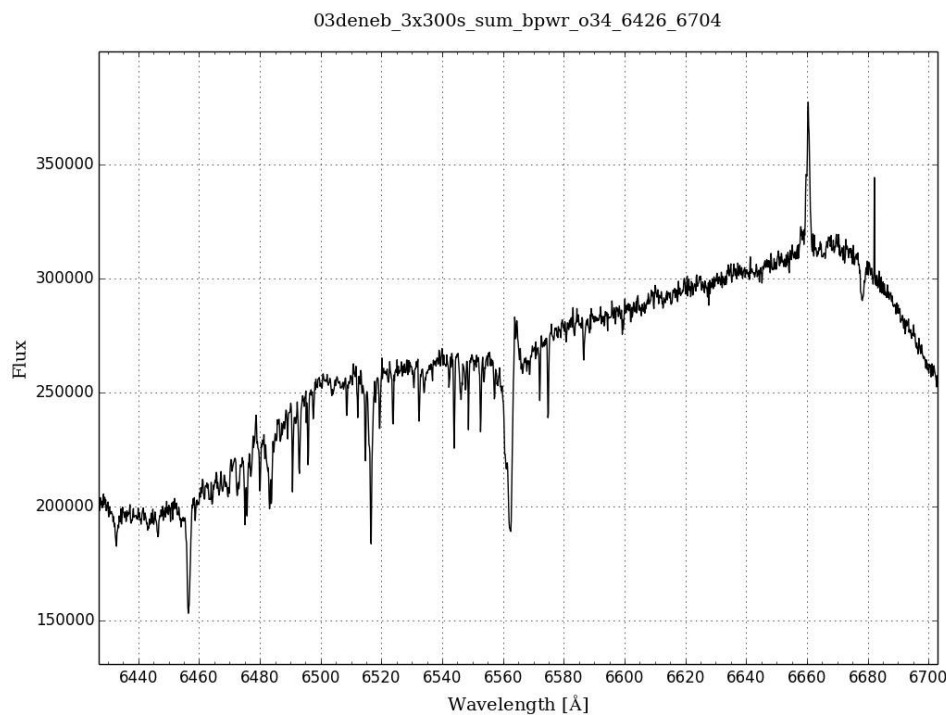


Abbildung 8: Wellenlängenkalibriertes Rohspektrum von Deneb in der 34. spektralen Ordnung am 10.10.2018

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, entfernen wir das Pseudokontinuum und normieren den Strahlungsfluss auf „1“. Alle Absorptionslinien (ausgenommen $H\alpha$), die dargestellt sind, befinden sich nun unter 1 (Abb. 10). Jegliche weiteren Berechnungen werden darauffolgend am normierten Spektrum vorgenommen.

Berechnet wird die Expansionsgeschwindigkeit des Sternwinds. Der Wert ergibt sich aus der Berechnung $v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} * c$, wobei $\Delta\lambda = \lambda_{\text{Rot}} - \lambda_{\text{Blau}}$ die Wellenlängendifferenz zwischen Emissionsmaximum und Absorptionsminimum darstellt (Abb. 3). Für den Vergleich von Deneb und P Cygni ermitteln wir außerdem die Äquivalentbreite EW (equivalent width). Hierbei wird die Fläche des Emissions- und Absorptionspeaks in ein kongruentes Rechteck umgewandelt, wodurch die Intensität der Strahlung errechnet wird. Dies geschieht im Programm *BASS*¹³.

¹² *MIDAS*: <https://www.baader-planetarium.com/de/mibas-midas-iraf-baader-astronomy-suite.html>

¹³ *BASS*: <https://uk.groups.yahoo.com/neo/groups/astrododger/info>

5. Ergebnisse

5.1 Deneb

Datum	Beginn der Aufnahme (UT)	Aufnahmemitte (UT)	Belichtungszeit	v (km/s)
22.06.2014	22:46:24	22:47:24	120s	87,3
08.09.2014	19:29:25	19:35:42	480s	92,3
02.08.2015	22:26:39	22:34:15	900s	79,6
06.08.2016	21:26:58	21:34:46	900s	95,1
15.08.2016	20:20:47	20:37:22	660s	125,3
12.09.2016	22:13:49	22:19:11	600s	64,9
26.05.2017	23:16:51	23:24:24	900s	79,1
10.06.2017	21:53:29	21:58:30	600s	67,2
16.08.2017	21:05:14	21:12:47	900s	70,4
19.08.2017	21:31:43	21:39:15	900s	77,7
15.10.2017	17:42:38	17:50:10	900s	73,6
19.10.2017	18:12:50	18:20:21	900s	65,4
10.10.2018	18:37:17	19:37:17	60s	66,3

Abbildung 9: Wertetabelle der Denebspektren

Die Ergebnisse unserer Berechnungen der Expansionsgeschwindigkeit von Deneb sind rechts (Geschwindigkeit des Sternwinds) eingetragen. Dieser liegt bei allen Werten zwischen 64,9km/s und 125,3km/s.

Trotz der großen Ähnlichkeit, die alle P-Cygni-Profile unserer Messungen aufweisen, sind auch Ausschläge vorhanden, die sich voneinander abheben. Diese sind einerseits an den Überlagerungen der Spektren, andererseits durch die unterschiedlichen Werte der Sternwindgeschwindigkeitsmessungen zu erkennen. Der Sternwind ist trotz seiner beinahe konstanten Geschwindigkeit veränderlich und es treten in unregelmäßigen Abständen „High-velocity absorption“-Ereignis (HVA) ein. Diese beschreiben große Massenausbrüche, wodurch der Sternwind verdichtet wird und anhand der Veränderung im Spektrum deutlich wird, dass der Wind rotiert. Die Verdichtung nimmt mit zunehmender Zeit wieder ab und das P-Cygni-Profil zeigt die gewohnte Form.

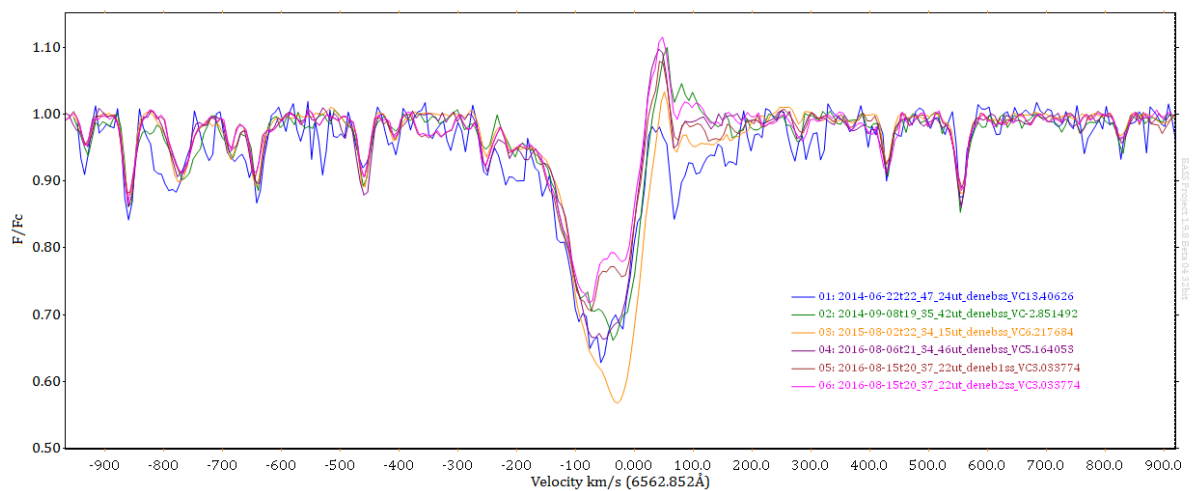


Abbildung 10: Variation der H α -Linie im Spektrum von Deneb im Zeitraum Juni 2014 - August 2016

Anhand der Überlagerungen unserer Ergebnisse lässt sich in Abbildung 10 feststellen, dass zwischen 2014 und 2016 einige Masseausbrüche stattgefunden haben. Diese können sich durch zusätzliche Absorptionseinsenkungen zeigen. Besonders die Aufnahmen vom 22.06.2014 (siehe Abb. 11; blaue Linie) zeigt starke Unterschiede bezüglich der Absorptions- und Emissionslinien. Obwohl aus diesem Zeitraum nur ein Spektrum vorliegt, ist es möglich, dass die starken Variationen (im Vergleich zu den folgenden Spektren) auf ein HVA-Ereignis hinweisen. Vermutlich liegt dieses bereits zu diesem Zeitpunkt einige Wochen zurück, da das veränderte Spektrum mehrere kleine Variationen im Emissions- und Absorptionsbereich darstellt, die auf einen Rückgang dieser hindeuten. Das zeitlich darauffolgende Spektrum (siehe Abb. 11; grüne Linie) wurde ungefähr drei Monate später (08.09.2014) aufgenommen und zeigt eine erneute „Verklumpung“ im Absorptionsbereich. Diese ist vergleichsweise klein, allerdings hebt sich der Geschwindigkeitswert in der Tabelle von den anderen ab (92,3km/s). Trotzdem ist es eher unwahrscheinlich, dass dieser Ausbruch in Kombination mit der vorherigen Variation steht, da diese 3 Monate auseinanderliegen und eine Periode der zuvor gemessenen starken Variation in 2001 und vorheriger nur 40 Tage in Anspruch genommen hat.

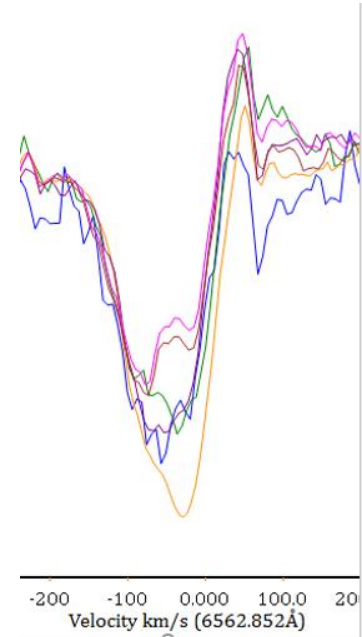


Abbildung 11: Deneb, H α -Linie 2014-2016

Im Zeitraum vom 15.08.2016 bis zum 12.09.2016 scheint sich in unseren Spektren ein solches Ereignis zu finden. Da allerdings nur zwei Spektren aus diesem Zeitraum vorhanden sind, können lediglich spekulative Überlegungen getätigt werden (siehe Abb. 11, violette und rosafarbenes Spektrum).

Die starke Variation des Profils im blauverschobenen Bereich weist deutlich auf einen Massenausbruch hin. Auch bei weiteren Vergleichen der Spektren kann die zusätzlich zu absorbierende Materie als „Verklumpungen“ im Sternwind erfasst werden. Diese Verdichtungen bestätigen die vorausgegangene Hypothese des Auftretens kleiner Ausbrüche. Diese Periode dauerte ca. 30 Tage, also ungefähr zehn Tage weniger als jenes HVA Ereignis im Jahr 2001. Obwohl hier nur eine relativ geringere Veränderung im Profil zu sehen ist, beträgt die Zeitspanne $\frac{3}{4}$ der Zeit des starken Ereignisses. Dies deutet daraufhin, dass unsere Ergebnisse einen höheren Wert haben, als auf den ersten Blick zu erkennen ist. Passend zur Dauer des Ereignisses beschreiben auch die Expansionsgeschwindigkeiten deutliche Ausschläge. An dieser Stelle steigt die Geschwindigkeit bis zu 125,3km/s. Auffällig ist ebenfalls der starke Werteabfall, denn ca. einen Monat später beträgt die Geschwindigkeit 64,9km/s, den niedrigsten unserer gemessenen Werte. Vor dem Eintritt des Ausbruchs lag die gemessene Geschwindigkeit noch zwischen 87,3km/s und 95,1km/s, was einen deutlichen Unterschied zum Wert danach aufzeigt.

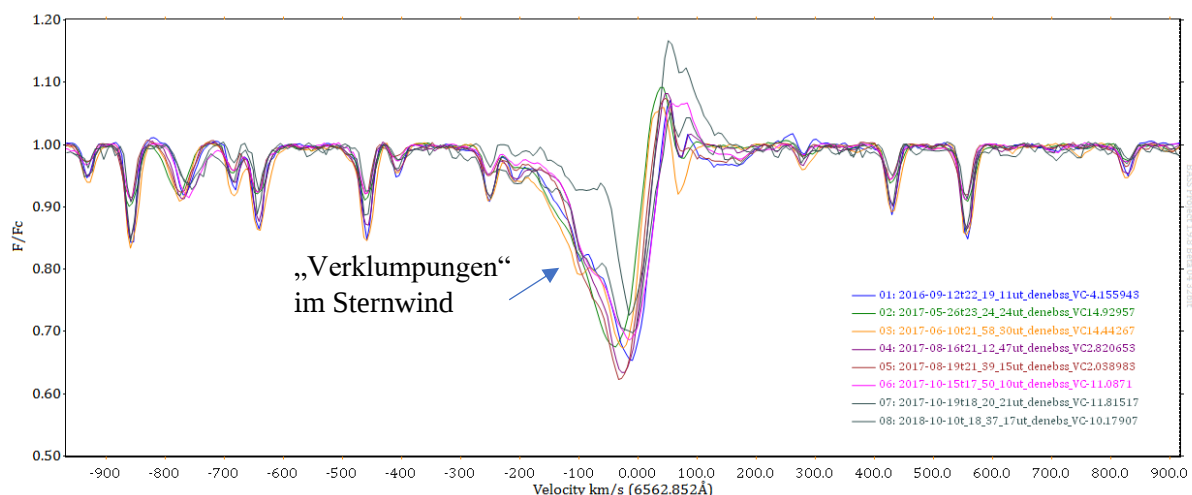


Abbildung 12: Variation der H α -Linie im Spektrum von Deneb im Zeitraum September 2016 - Oktober 2018

Abbildung 12 zeigt die Spektren von September 2016 bis Oktober 2018. In diesem Zeitraum scheinen zwar vereinzelt Massenausbrüche erfolgt zu sein, jedoch in geringerem Maße als in den vorangegangenen Jahren. Das Profil um $H\alpha$ bleibt konstant, lediglich die hier blau und grün dargestellten Spektren vom 12.09.2016 und 19.10.2017 weisen vereinzelte Variationen im Absorptionsbereich auf.

Besonders auffällig zeigt sich das Spektrum, welches von uns am 10.10.2018 aufgenommen wurde (siehe Abb. 13, graues Kontinuum). Innerhalb von ca. einem Jahr ist hier eine deutliche Verschiebung nach rechts sichtbar. Dies deutet daraufhin, dass die Ausbrüche, welche die Änderung des Spektrums hervorgeufen haben, bereits im Zeitraum vor der Aufnahme stattgefunden haben und demnach bereits kälter sind als jene, die sich näher am Stern befinden.

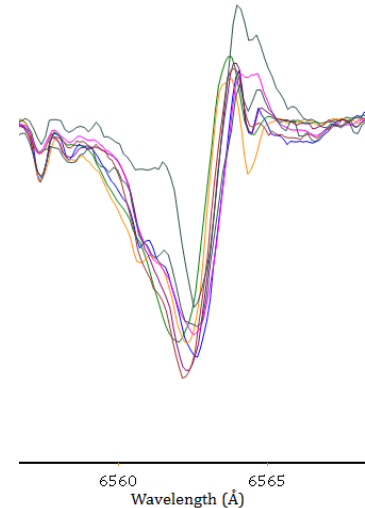


Abbildung 13: Deneb, $H\alpha$ -Linie 2016-2018

5.2 Vergleich von Deneb und P Cygni

	Deneb	P Cygni
Temperatur	$8400\text{K} \pm 75\text{K}$	$18000\text{-}20000\text{K}$
Absolute Helligkeit	$-8,49 \pm 0,18 \text{ mag}$	$-6,65 \pm 1,05 \text{ mag}$
Masse	$18\text{-}25 M_{\odot}$	$30\text{-}60 M_{\odot}$
Radius	$200\text{-}220 R_{\odot}$	$76 R_{\odot}$
Abstand zur Erde	800 pc	1700 pc
Leuchtkraft	$196000 L_{\odot}$	$610000 L_{\odot}$
Spektralklasse	A2 Ia	B1-2 Ia-0
Radialgeschwindigkeit	$-4,5 \text{ km/s}$	$-8,9 \pm 0,8 \text{ km/s}$
Expansionsgeschwindigkeit (eigen Werte)	$64,9\text{-}125,3 \text{ km/s}$	$193,4 \text{ km/s}$

Abbildung 14: Wertetabelle von Deneb und P Cygni

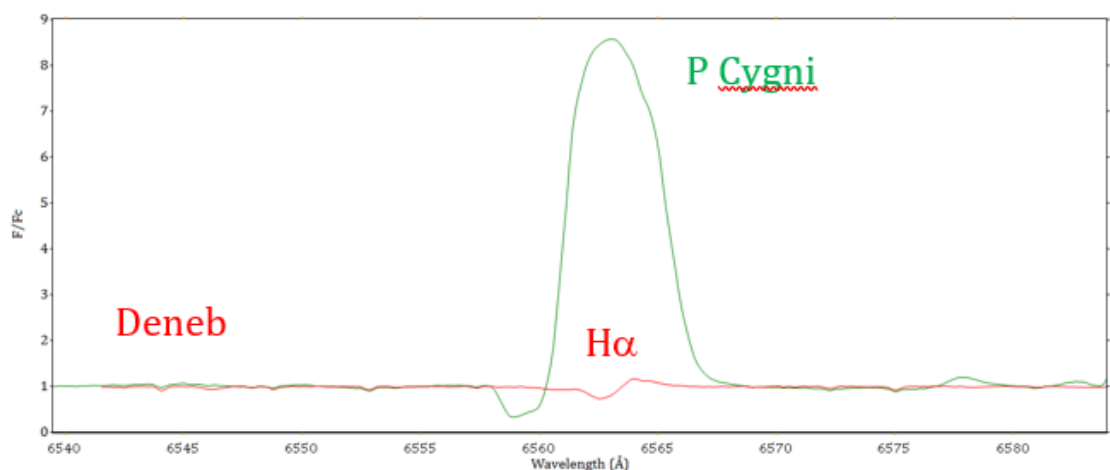


Abbildung 15: normierte Spektren von Deneb (rot) und P Cygni (grün) überlagert

Die hier dargestellten P Cygni Profile von Deneb (rot) und P Cygni (grün) unterscheiden sich deutlich. Das Profil von P Cygni weist im Vergleich eine stärkere Absorption, aber vor allem eine hochgradige Emission auf. Die Sternwinde von P Cygni übertreffen Denebs Sternwinde und deren Intensität um ein Vielfaches. Unsere Berechnungen ergeben für die Expansionsgeschwindigkeit des Sternwindes von P Cygni ebenfalls einen wesentlich

höheren Wert. Im Vergleich zu den gemessenen Geschwindigkeiten bei Deneb erreichen unsere Messungen bei P Cygni einen Wert von 193,4 km/s. Der höchste gemessene Wert von Deneb liegt bei 125,3 km/s.

Die starken Differenzen sind bereits am Rohspektrum ablesbar, (Abb. 16, 17). Die dargestellten Echelle-Spektren vom 10.10.2018 von Deneb und P Cygni geben deutlich zu erkennen, dass P Cygni bei allen drei markierten Spektrallinien ($H\alpha$ 6563Å = roter Pfeil; $H\beta$ 4861Å = blauer Pfeil; He I 6678Å = weißer Pfeil) eine wesentliche stärkere Emission aufweisen als die markierten Spektrallinien von Deneb (Abb. 16, 17). Dies unterstützt unsere zuvor aufgestellte These, dass P Cygni an mehreren Stellen das charakteristische Linienprofil besitzt, wohingegen es bei Deneb nur noch zu erahnen ist.

Die Spektrallinie $H\beta$ besitzt eine höhere Anregungsenergie, was auf eine höhere Temperatur schließen lässt. Dementsprechend bezieht sich die $H\beta$ -Linie auf heißere Teile des Sterns, demnach auf weiter innen liegende Bereiche. Somit ist der Sternwind von P Cygni wesentlich stärker und ausgeprägter, da dieser auch im Bereich der $H\beta$ -Linie strahlt, wobei er bei Deneb nur im Bereich der $H\alpha$ -Linie Strahlung emittiert. Dies lässt sich anhand der Intensität der Profile an den gegebenen Linien feststellen.

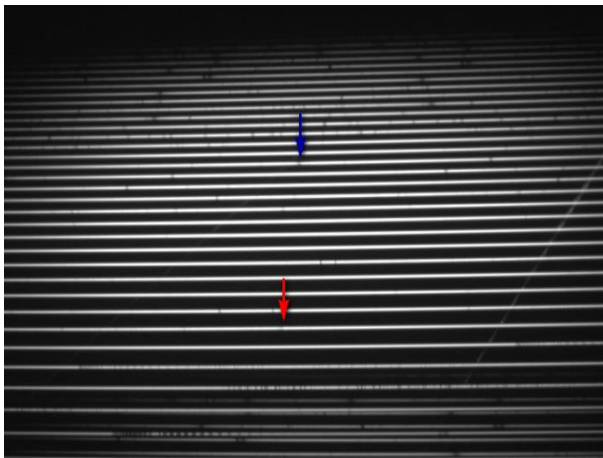


Abbildung 16: Rohspektrum von Deneb (10.10.2018)

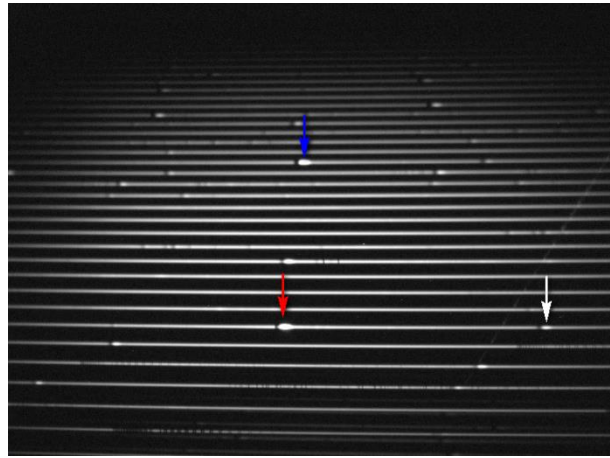


Abbildung 17: Rohspektrum von P Cygni (10.10.2018)

Die Abbildung 18 der Linienverläufe der kalibrierten Spektren verdeutlichen die Unterschiede beider Sterne in Bezug auf ihre $H\beta$ -Linien. Während bei P Cygni ein klares P Cygni Profil sichtbar ist, erkennt man bei Deneb lediglich eine Absorption, die auch im Rohspektrum erkannt werden kann. Der Verlauf an der He I-Linie sticht im Vergleich noch stärker hervor (Abb. 19). Erneut weist P Cygni das charakteristische Linienprofil auf, doch Deneb zeigt nur eine schwache Absorption. Dies zeigt sich auch am Rohspektrum, da man diese mit bloßem Auge nicht erkennt.

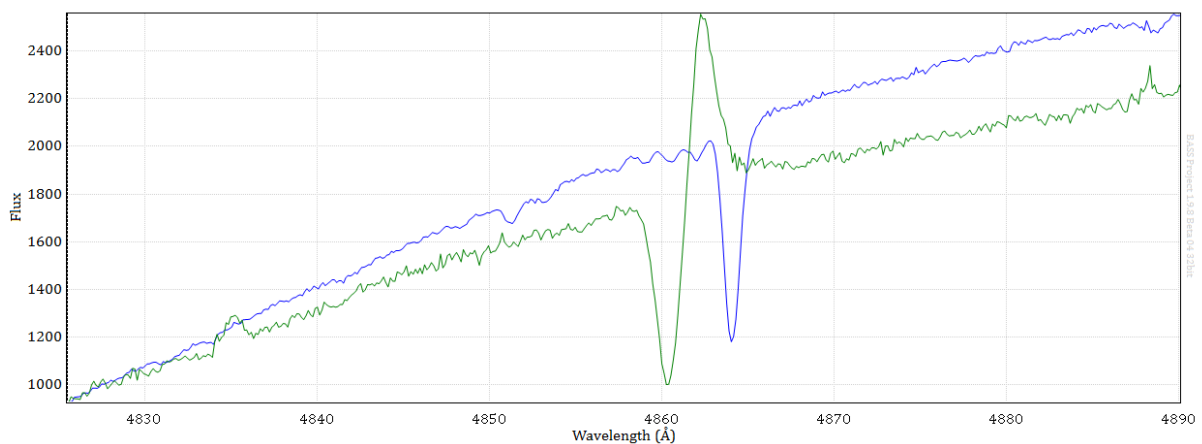


Abbildung 18: Linienverläufe der wellenlängenkalibrierten Spektren mit sichtbarem Profil bei $H\beta$; P Cygni = grün, Deneb = blau; 10.10.2018

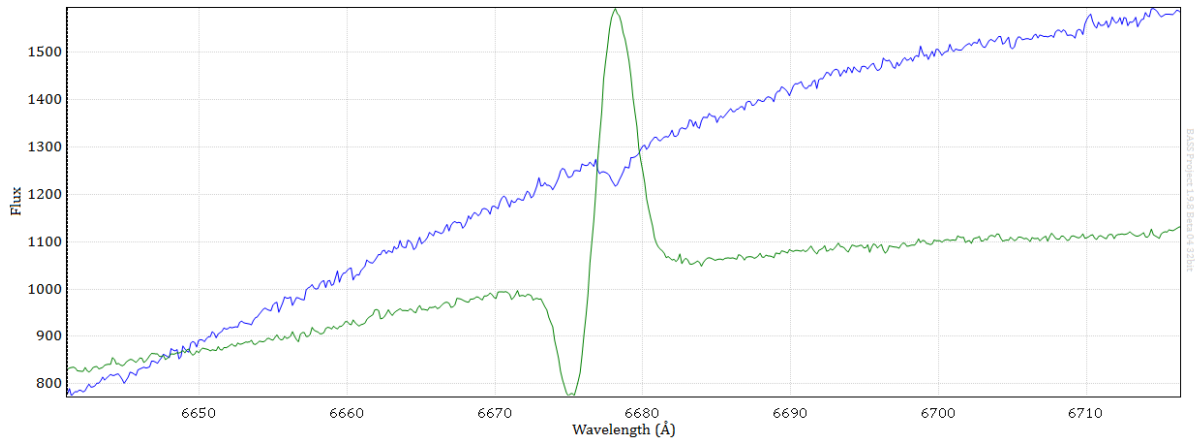


Abbildung 19: Linienvverläufe der wellenlängenkalibrierten Spektren mit sichtbarem Profil bei He I; P Cygni = grün, Deneb = blau; 10.10.2018;

Zu Verdeutlichung der Unterschiede im Strahlungsfluss wird die Äquivalentbreite EW (grüner Bereich in Abb. 20 und 21) mit BASS errechnet. Dieses liegt bei 128:1, wobei P Cygni die höhere Strahlungsintensität aufweist. Dies lässt sich auf die hohen Temperaturdifferenzen und die vielfache Leuchtkraft von P Cygni zurückführen. Diese Parameter sind ausschlaggebend für die Strahlungsintensität und den stärkeren Sternwind von P Cygni.

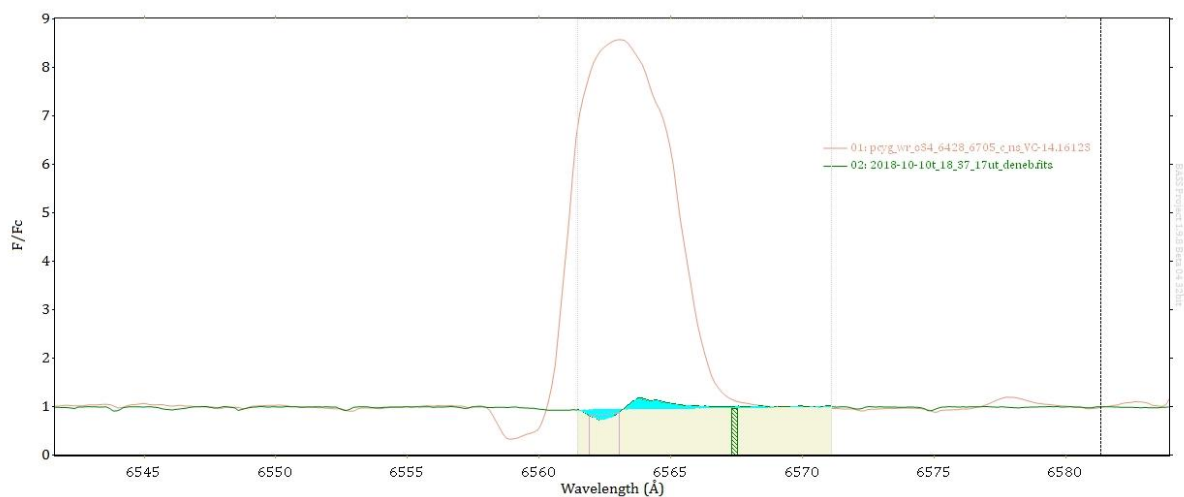


Abbildung 20: Äquivalentbreite EW; türkis markiert = gemessene Fläche von Deneb

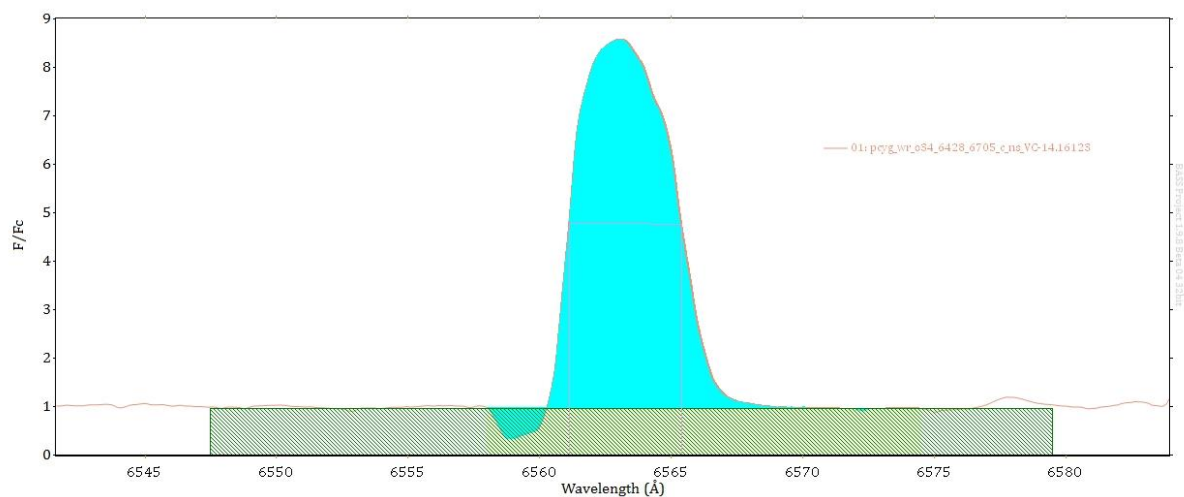


Abbildung 21: Äquivalentbreite EW; türkis markiert = gemessene Fläche von P Cygni

6. Fazit

Die von uns erarbeiteten Messergebnisse bestätigen die Annahme, dass Deneb weiterhin einen stark variierenden Sternwind besitzt. Zwar konnten wir kein außergewöhnlich starkes HVA-Ereignis beobachten, haben aber trotzdem mehrere Variationen und Ausbrüche vermessen können. Besonders auffällig war in dieser Periode das Ereignis im Zeitraum vom 15.08.2016 bis zum 12.09.2016. Die Stärke des Ereignisses nähert sich dem zuvor gemessenen HVA-Ereignis im Jahr 2001 und sticht mit der Geschwindigkeitsmessung und Veränderung des Kontinuums aus der Messreihe hervor. Zusätzlich konnten wir zeigen, dass die Ausbrüche noch immer in unregelmäßigen Abständen erfolgen. Demnach können wir einen Zusammenhang zwischen der Rotationsperiode und der Variabilität des Sternwindes vorerst ausschließen.

Der Vergleich der beiden LBV-Sterne gibt zudem Aufschlüsse über die Hintergründe der Sternwinde und ihrer Strahlungsintensität. Diese helfen uns beim Verständnis beider Sternwinde und verkörpern einen aktuellen Messdatenvergleich zur Erforschung des P Cygni Profils.

7. Danksagung

Großer Dank gilt unserem Projektbetreuer Bernd Koch, der uns in allen Phasen unseres Projektes jederzeit für Fragen und Hilfestellungen zur Verfügung stand. Er lehrte uns alle relevanten Grundlagen, stand in jeder Phase der Entwicklung unserer Forschungsarbeit bei. Ohne seine Unterstützung hätte unsere Projektarbeit nicht auf diese Weise zustande kommen können.

8. Abschlusserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von uns angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Projektarbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben. Wir sind damit einverstanden, dass die von uns verfasste Verschriftlichung unseres Projekts der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Juliane Neußer

Moritz van Eimern

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit P Cygni, Deneb und der Sonne (rote Pfeile).....	3
Abbildung 2: Übersichtsspektrum eines LBV-Sterns Deneb im Sternbild Schwan. Das Spektrum wurde von den Autoren aufgenommen.	4
Abbildung 3: P Cygni Profil mit Emission und Absorption.....	5
Abbildung 4: DADOS Spektrograph mit angeschlossener CCD-Kamera (rot)	6
Abbildung 5: Echelle Spektrograph und CCD-Kamera (rot) angebracht am CDK 20	6
Abbildung 6: Teleskop CDK 20. Foto: Kevin Pixberg, Fabian Neußer.....	6
Abbildung 7: Guiding Software SpecTrack	7
Abbildung 8: Plot der 34. Spektralen Ordnung mit Intensitätsverteilung 10.10.2018	8
Abbildung 9: Wertetabelle der Denebspektren	9
Abbildung 10: Variation der $H\alpha$ -Linie im Spektrum von Deneb im Zeitraum Juni 2014 - August 2016	9
Abbildung 11: Deneb, $H\alpha$ -Linie 2014-2016	10
Abbildung 12: Variation der $H\alpha$ -Linie im Spektrum von Deneb im Zeitraum September 2016 - Oktober 2018.....	10
Abbildung 13: Deneb, $H\alpha$ -Linie 2016-2018	11
Abbildung 14: normierte Spektren von Deneb (rot) und P Cygni (grün) überlagert.....	11
Abbildung 15: Wertetabelle von Deneb und P Cygni	11
Abbildung 16: Rohspektrum von Deneb (10.10.2018)	12
Abbildung 17: Rohspektrum von P Cygni (10.10.2018).....	12
Abbildung 18: Linienvverläufe der kalibrierten Spektren mit sichtbarem Profil bei $H\beta$; P Cygni = grün, Deneb = blau; 10.10.2018	12
Abbildung 19: Linienvverläufe der kalibrierten Spektren mit sichtbarem Profil bei He I; P Cygni = grün, Deneb = blau; 10.10.2018;	13
Abbildung 20: Äquivalentbreite EW; türkis markiert = gemessene Fläche von Deneb.....	13
Abbildung 21: Äquivalentbreite EW; türkis markiert = gemessene Fläche von P Cygni	13

Literaturverzeichnis

[1] A Five-year Spectroscopic and Photometric Campaign on the Prototypical α Cygni Variable and A-type Supergiant Star Deneb; N. D. Richardson¹, N. D. Morrison², E. E. Kryukova², S. J. Adelman³

[2] Quantitative spectroscopy of Deneb; F. Schiller and N. Przybilla; Dr. Remeis-Sternwarte Bamberg, Sternwartstr. 7, D-96049 Bamberg, Germany; Astronomy & Astrophysics manuscript no. Deneb'paper c ESO 2018, October 30, 2018:

Aufdenberg, J.P., Hauschildt, P.H., Baron, E. et al. 2002, ApJ, 570, 344

Burnashev, V.I. 1980, Izv. Krym. Astrofiz. Obs. 3, 62

Blackwell, D.E., Petford A.D., & Shallis M.J. 1980, A&A, 82, 249

Groth, H.-G. 1961, ZAp, 51, 231

[3] AN ATLAS OF THEORETICAL P CYGNI PROFILES; John I. Castor and Henny J. G. L. M. Lamers*
Joint Institute for Laboratory Astrophysics, National Bureau of Standards and University of Colorado
Received 1978 July 14; accepted 1978 October 4:

Abt, H.A., 1957, ApJ, 126, 138

Abt, H.A., & Golson, J.C. 1966, ApJ, 143, 306

Barlow, M. J. & Cohen, M. 1977, ApJ, 213, 737

Cranmer, S. & Owocki, S. 1996, ApJ, 462, 469

Fath, E. 1935, Lick Obs. Bull., 17, 115

Kaufer, A. et al. 1996, A&A, 305, 887

Kaufer, A. et al. 1997, A&A, 320, 273

Kudritzki, R.P. et al. 1999a, A&A, 350, 970

Kudritzki, R.P. et al. 1999b, in IAU

Lucy, L. B. 1976, ApJ, 206, 499

Maeder, A. 1980, A&A, 90, 311

Markova, N., Prinja, R. K., Markov,

Morrison, N.D. and C.L. Mulliss. 1997,

Morrison, N.D., Knauth, D. C.,

Paddock, G. 1935, Lick Obs. Bull., 17, 99

Parthasarathy, M. and D. Lambert. 1987, J. Astrophys. Astr., 8, 51

Beals, C. S. 1929, M.N.R.A.S., 9th 202. 1951, Pub. Dom. Ap. Obs., 9, 1.

Lamers, H. J. G. L. M., and Morton, D. C. 1976, Ap. J. Suppl., 32, 715 (LM).

Lamers, H. J. G. L. M., and Rogerson, J. B. 1978, Astr. Ap., 66, 417.

Lamers, H. J. G. L. M., Stalio, R., and Kondo, Y. 1978, Ap. J., 223, 207.

Lamers, H. J. G. L. M., van den Heuvel, E. P. J., and Petterson, J. A. 1976, Astr. Ap., 49, 327.

Snow, T. P., and Morton, D. C. 1976, Ap. J. Suppl., 32, 429

[4] Subtle structures in the wind of P Cygni; F. Vakili, D. Mourard, D. Bonneau, F. Morand, and Ph. Stee
Observatoire de la Cote d'Azur, Departement Fresnel, CNRS URA 1361, GI2T, F-06460 Saint Vallier de Thiey, France; Received 16 October 1996 / Accepted 18 December 1996:

Barlow, M.J., Drew, J.E., Meaburn, J., Massey, R.M., 1994, MNRAS, 268, L29-L34

Conti, P.S., 1984, in

Davidson K., 1986, in Instabilities in Luminous Early Type Stars, eds. Lamers and de Loore, D. Reidel Publishing Company, pp127-142

de Groot, M.J.H, Lamers, H.J.G.L.M., January 1992, Nature, 355, 422-423

de Vos M., 1992, Optical Interferometry with SCASIS, PhD. Dissertation. University of Groningen, The Netherlands

Lamers H.J.G.L.M., 1986, in *Instabilities in Luminous Early Type Stars*, eds. Lamers and de Loore, D. Reidel Publishing Company, pp99-126

Lamers, H.J.G.L.M., de Groot, M., Cassatella, A., 1983, *A&A*, 128, 299-310.

Nishimoto, D., Africano, J., Morossi, C., et al., 1994, *Bulletin of AAS*, 185, dec., 1455-1456

Richardson, L.L., Brown, J.C., Simmons, J.F.L., 1996, *A&A*, 306, 519

[4] Abbildung 6:

K. Pixberg & F. Neußer. *Der spektroskopische Doppelstern VV Cephei*. 1. Juni 2016. url: http://www.baader-planetarium.com/de/downloads/dl/file/id/488/product/2876/der_spektroskopische_doppelstern_vv_cephei_sch_lerarbeit_von_kevin_pixberg_und_fabian_neusser.pdf.