

# Fische, Forschung, Georges Lemaître

von Thomas Eversberg

Ich wusste, was mich erwartet. Ich wusste, dass ich deprimiert auf dem Berg ankommen würde. Doch ich musste da durch! Ich spreche von den Supermärkten der Atlantikinsel Teneriffa und ihren Fischtheken, die mir auf dem Weg zum Observatorium nicht erspart blieben. Angesichts des seekulinarischen Angebots in Deutschland ist die Fischtheke jedes kanarischen Supermarktes ein Paradies – schon mal einen Bonito probiert? Und am Teleskop auf dem Teide gab es nur eine Mikrowelle ... Voller Verzweiflung erstand ich eine Konserve Sardinen in Olivenöl und machte mich mit meinem dänischen Beobachtungspartner Knud



1

Auf dem Gelände des Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) auf Teneriffa in 2.400 m Höhe

## Die provisorischen Relativzahlen des SONNE-Netzes 2. Halbjahr 2014

von Andreas Bulling

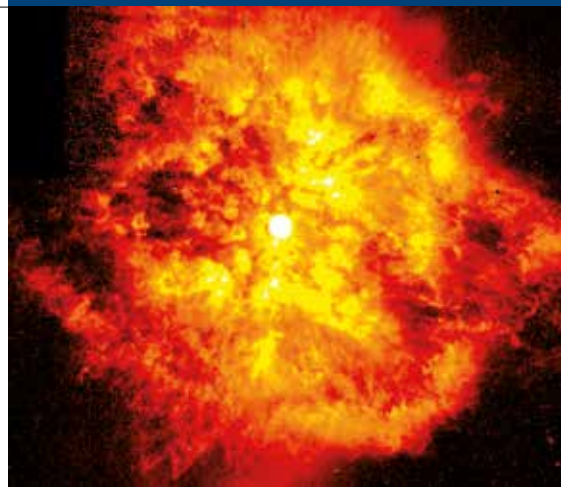
Tag	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
1	59	71	49	36	83	84
2	83	80	62	49	67	95
3	84	74	53	52	84	82
4	86	57	59	57	94	85
5	83	56	45	41	86	74
6	92	52	36	33	100	71
7	101	59	30	55	107	57
8	89	64	14	65	89	70
9	80	44	11	78	77	92
10	65	50	16	77	75	132
11	58	55	37	95	78	104
12	51	66	38	81	106	89
13	33	76	26	91	111	95
14	43	78	16	87	130	96
15	52	86	10	77	132	76
16	52	69	17	73	124	75
17	55	70	27	100	120	95
18	76	76	42	110	93	104
19	64	94	49	96	75	91
20	45	92	61	77	63	93
21	43	107	52	103	59	110
22	41	97	61	83	49	82
23	57	92	54	102	46	82
24	54	55	44	93	49	73
25	60	39	48	94	28	67
26	52	34	41	86	29	75
27	52	37	43	104	57	72
28	51	36	41	109	71	77
29	73	39	37	108	59	79
30	64	46	37	99	72	75
31	71	55	–	93	–	84
Mittel	63,5	64,7	38,5	80,8	80,4	85,0

weiter auf den Weg 2 Kilometer höher, um mein seelisches Gleichgewicht unter einem Seeing von 0,4 Bogensekunden zurückzuerlangen.

Die Zusammenarbeit zwischen Profis und Amateuren (ProAm) bei spektroskopischen Untersuchungen massereicher Sterne ist schon beinahe ein fester Bestandteil der Aktivitäten innerhalb der VdS-Fachgruppe Spektroskopie. Schon 2009 hatten wir mit weltweit rund 30 Kolleginnen und Kollegen in einer knapp viermonatigen Kampagne am 50-cm-Teleskop des Teide-Observatoriums erfolgreich den Doppelstern WR 140 untersucht [1, 2]. Zwei Jahre später war ich dann an einer neuen einwöchigen Kampagne über den Be-Stern Delta Scorpii beteiligt, den eine ProAm-Gruppe am 80-cm-Teide-Teleskop IAC 80 untersuchte. Allerdings konnte ich damals nicht vor Ort sein, sondern nahm zu dieser Zeit an einer Profikonferenz über massereiche Sterne in Kanada teil. Während eines abendlichen Konferenzgesprächs mit den dortigen Kollegen machte ich klar, dass ich als selbstzahlender Amateur keinesfalls ohne eine neue ProAm-Kampagne nach Hause fliegen würde – wäre ja noch schöner! Wir setzten uns also zu Fünft am folgenden Abend zu Bier und Brainstorming zusammen und entwickelten die Idee, die drei von den Messieurs Charles Wolf und Georges Rayet entdeckten und daher nach ihnen benannten ersten Wolf-Rayet-Sterne WR 134, WR 135 und WR 137 genauer zu untersuchen.

Wolf-Rayet-Sterne (WR-Sterne) gehören zur Gruppe massereicher Sterne. Diese Sterne beginnen ihre Entwicklung auf der Hauptreihe mit über 8 Sonnenmassen und enden als Supernovae. Sie liefern bei der internen Elementsynthese trotz ihrer relativen Seltenheit gegenüber normalen Hauptreihensternen den Löwenanteil schwerer Elemente im Universum und verfüttern diese Spezies in Form starker Sternwinde an das interstellare Medium. Außerdem dominieren massereiche Sterne das Strahlungsfeld jeder Galaxis. Beobachtet man Galaxien, so sieht man zuerst solche Biester. Am Ende ihrer Entwicklung vor der finalen Supernova durchlaufen die massereichsten Sterne (mehr als 25 Sonnenmassen zu Beginn ihres Lebens) eine besondere Phase. Nachdem ihr Wasserstoffreservoir aufgebraucht ist, zündet Helium (die „Asche“ des Wasserstoffs) in ihrem inneren Kern. Wegen der inneren Kontraktion und damit einhergehender höherer Temperatur wird der Stern kompakter und kann damit Helium verbrennen. Außerdem werden die äußeren und weniger dichten Schichten durch von der Sternstrahlung angetriebenen sehr starken Sternwind abgestoßen.

Genau diesen Zustand beobachteten Wolf & Rayet, als sie die neue Sternklasse entdeckten. Diese evolutionäre Phase im Leben eines massereichen Sterns ist so kurz, das man nur wenige hundert Wolf-Rayet-Sterne in unserer Galaxis findet. Das besondere Merkmal von Wolf-Rayet-Sternen ist ein äußerst starker und optisch dichter Sternwind, der erst in einer Distanz von rund 2 Sternradien durchsichtig wird und rund eine Milliarde Mal stärker ist als bei unserer Sonne. Die Oberfläche des Sterns ist also nicht sichtbar und daher können WR-Sterne auch nicht mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm über die Effektivtemperatur der Photosphäre klassifiziert werden. Abhängig von unterschiedlichen theoretischen Modellen werden Effektivtemperaturen von 30.000 bis 150.000 K vermutet. Für unsere geplante Kampagne war dabei relevant, dass Wolf-Rayet-Winde nicht glatt und ungestört radial nach außen strömen, sondern komplexe Strukturen zeigen. Diese sind a) stochastische Turbulenzen, die sich in Windklumpen höherer Dichte manifestieren und b) spiralähnliche Strukturen, die mit



2

**Hubble-Space-Telescope-Aufnahme eines stochastisch geklumpten WR-Windes in großer Distanz vom Stern (NASA/STScI)**

dem darunterliegenden Stern mitrotieren. Letztere wurden schon bei der Sonne beobachtet und verweisen auf Störungen an der Windbasis, die sich beim Abströmen bis oberhalb des optisch dichten Windes zeigen.

a) Die klumpige Struktur in den Winden massereicher Sterne reflektiert wahrscheinlich Multi-Skalen-Turbulenzen. Das heißt, wenige große turbulente Wirbel direkt über der unsichtbaren Photosphäre bewegen sich nach außen und werden kaskadenartig kleiner, bevor die Energie aus dem Wind in das interstellare Medium abgeführt wird. Allerdings erfordern Turbulenzen einen Treiber. Bei Sternen werden Instabilitäten entweder von der Sternstrahlung induziert oder von zufälligen Konvektionsbewegungen an der stellaren Oberfläche. Seit etwa zwei Jahrzehnten kämpfen Astronomen mit nur mäßigem Erfolg um das Verständnis von Windklumpen. Wir wissen immer noch nicht, wie Klumpen korrekt quantifiziert werden können. Das ist insofern problematisch, da Klumpen einen wichtigen Einfluss auf die entsprechenden Massenverlusten ausüben und somit entscheidend sind für das Verständnis der evolutionären Entwicklung massereicher Sterne.

b) Da wir im Gegensatz zu gewöhnlichen Sternen die Oberfläche (Photosphäre) bei WR-Sternen wegen des optisch dicken Windes nicht sehen können, braucht man eine „Sonde“, die bis zur Oberfläche reicht, um Informationen zur Sternrotation zu erhalten. Im vorliegenden Fall sind dies sog. „Corotating Interaction Regions“ (CIR), also „mitrotierende, wechselwirkende Regionen“. Es handelt sich um die schon angesprochenen spiralähnlichen Strukturen, die mit dem darunterliegenden Stern mitrotieren. Windmaterial einer bestimmten Geschwindigkeit

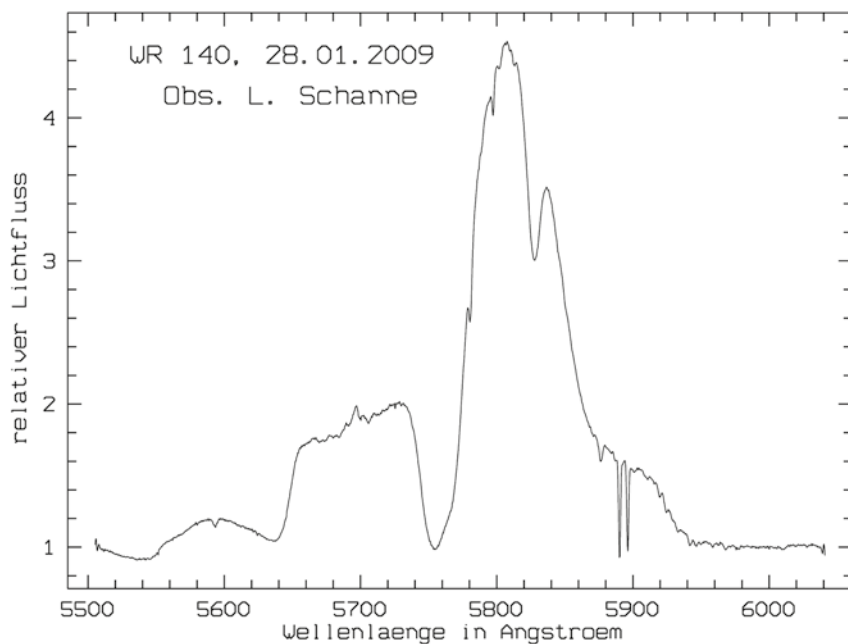
wird von einer lokalen äquatorialen Region an der Sternoberfläche mit einer bestimmten Geschwindigkeit abgestoßen (typischerweise 2.000 km/s) und von schnellerem Windmaterial einer anderen Region anderer „geografischer“ Länge auf dem Weg nach außen eingeholt und durch Überschallschocks verdichtet. Die Untersuchung der Rotation ist insofern wichtig, da sie einen direkten Einfluss auf die Sternevolution hat. Man nimmt an, dass schnelle Rotatoren die Vorläufer von Gamma Ray Bursts sind, die bei einem Ausbruch heller leuchten als das gesamte restliche Universum.



3

**Darstellung von vier Corotating Interaction Regions (Dessart 2004, A&A 423, 693)**

Man sollte sich vor Augen halten, dass solche Untersuchungen nur mit spektroskopischen Methoden möglich sind. Nur sie liefern uns Informationen über die dreidimensionale Struktur in direkter Sternnähe. Die variablen Windstrukturen sollten sich in zeitlichen Veränderungen der Emissionslinien widerspiegeln (vgl. Spektrum in Abb. 4). In der HST-Aufnahme (Abb. 2) hätte der zentrale Stern maßstabsgerecht die Größe eines Atoms. Abbildende Techniken für Informationen in direkter Sternnähe sind also hoffnungslos.



4

Spektrum von WR 140 (L. Schanne, 2009)

Das war also unsere Forschungs-idee in kleiner Runde, und im Laufe unseres kanadischen Abends wuchs die Zahl leerer Flaschen bis zum Morgen - aber auch die Gruppe interessierter Astronomen. An unserem Tisch war etwas los, wir hatten Spaß! Und das merkten Kollegen aus verschiedenen Ländern. Kurz, am Ende waren wir rund 15 Leute aus drei Kontinenten, die bei diesen sehr genauen Untersuchungen dabei sein wollten. „Genau“ heißt hier: hoher Kontrast und hohe spektrale Auflösung. Und vor allem über einen langen Zeitraum und an verschiedenen Observatorien weltweit. Mit dieser Idee und unserer am Instituto Astrofisica de Canarias (IAC) bekanntermaßen erfolgreichen Teide-Kampagne 2009 stellten wir einen neuen Beobachtungsantrag für 4 Monate und 9 Beobachtungsteams am IAC 80 auf Teneriffa. Nach einigen Onlinerückfragen, aber auch Vortrag und Diskussion vor Ort auf Teneriffa, wurde unser Antrag bewilligt!

Professionelle Astronomen, denen ich diese Story erzähle, sind nicht wenig irritiert über unseren erfolgreichen Antrag - wer bekommt schon bitteschön vier Monate Beobachtungszeit an einem Profiobservatorium der 1. Liga? Allerdings besitzen unsere professionellen Kampagnenpartner ein außerordentliches Renommee und unsere diszipliniert

oder Studentin, um diese für eine Masterarbeit oder Promotion zu nutzen.

Bei scharfer Kalkulation zahlt man für den Flug nach Teneriffa, einen Mietwagen sowie den zweiwöchigen Aufenthalt am Observatorium etwa 1.000 Euro. Das ist insbesondere für Schüler und Studenten viel Geld. Sie haben daher in Relation zum eigenen Einkommen mit Abstand die größten Unkosten. Allerdings ist für Verrückte wie uns ein Forschungsarbeitsaufenthalt an einem Profiobservatorium offenbar Grund genug, an anderen Stellen zu sparen als an der Leidenschaft. Über allem schwebt das Ziel, Freude in einem internationalen Team Gleichgesinnter zu haben, neue Erfahrungen zu sammeln und die Ergebnisse in einem Profijournal zu veröffentlichen, wobei alle Beteiligten als Koautoren zeichnen. Letzteres ist besonders für unsere jüngsten Mitstreiter attraktiv. Welcher Schüler hat schon eine



5

IAC 80 und Teide (Gerrit Grutzeck)

durchgeführten früheren Teide-Kampagnen inklusive mehrerer Publikationen haben wohl auch nicht geschadet. Man liest halt mit. Unsere bewährte Strategie: Die Profis unterstützen uns bei der wissenschaftlichen Hintergrundarbeit und diskutieren mit uns mögliche Untersuchungen, die nur in längeren Zeiträumen und damit an kleinen Teleskopen bis 1 Meter Öffnung möglich sind. Ein kleines ProAm-Team schreibt den Teleskopantrag und alle Amateurbeobachter zahlen ihren Aufenthalt aus eigener Tasche. Im Gegenzug liefert das Beobachterteam alle gewonnenen Daten an eine(n) Studenten

internationale und von Wissenschaftlern geprüfte Forschungspublikation auf dem Kerbholz?

Nach der Beobachtungszusage ging die wirkliche Arbeit für die Fachgruppe allerdings erst richtig los. Dazu gehörten die Zusammenstellung verschiedener Teams (im vorliegenden Fall 28 Kolleginnen und Kollegen aus Dänemark, Deutschland, Frankreich, Portugal und Spanien), die Buchung der Zimmer auf dem Berg und weitere administrative Dinge (Flüge, Mietwagen, Infos zur Unterkunft etc.). Außerdem koordinierten wir Ama-

teurbeobachtungen in England, Holland, Frankreich, der Schweiz, Kanada, den USA, China und Australien. Parallel dazu riefen wir in der professionellen Community zu weiteren Beobachtungen auf, was in einer Mailingliste von über 80 (!) Profis und Amateuren endete. Unter anderem erhielten wir Beobachtungszeit für fotometrische Messungen mit dem kanadisch/österreichischen MOST-Satelliten. Das wahre Highlight: Wir erhielten zwei Nächte am 10-Meter-Keck-Teleskop am Mauna Kea auf Hawaii. Boing!

Entscheidend für den Erfolg einer Beobachtungskampagne ist die Installation des spektroskopischen Instrumentariums durch das erste Team. Alle weiteren Gruppen können dann dieses Setup übernehmen und routinemäßig damit arbeiten. Dies sah so aus, dass ein privater Spektrograf an das Teleskop angeschlossen wurde und während der gesamten Kampagne nicht mehr manipuliert werden durfte. Zur Übergabe der Arbeit von Team zu Team haben wir jeweils eine überlappende Nacht eingerichtet. Das erschien zunächst etwas knapp, war die Kontrolleinheit des Teleskops doch recht komplex. Doch vor Ort löste sich diese Befürchtung in Luft auf, und nach jeweils drei Stunden hatten alle Neuankömmlinge die Prozeduren im Griff. Begeisterte Leute muss man eben haben!

Im Gegensatz zur Planung einer kurzen Beobachtungskampagne muss man bei einer viermonatigen Messung die Ziel-ephemeriden besonders im Auge behalten und womöglich zusätzliche Ziele anvisieren, um die Teleskopzeit optimal zu nutzen. Wir hatten wegen der unterschiedlichen Sichtbarkeitszeiten unserer WR-Sterne daher noch sekundäre Ziele in unser Programm aufgenommen. Dazu gehörte auch die spontane Beobachtung einer Zwergnova sowie einer klassischen Nova, die plötzlich aufleuchteten. Die Daten der Nova lieferten wir an eine ebenfalls entsprechende weltweite ProAm-Kampagne – in der spektroskopischen Amateurszene ist was los.

Unsere Routine wurde zwar durch ein paar bewölkte Nächte, aber auch von einigen technischen Problemen unterbrochen. Letztere wurden jedoch von den uns unterstützenden exzellenten IAC-Technikern und -Nachtassistenten gelöst.



6

**Installation des Spektrografen durch Daniel Weiss und Berthold Stober von Team 1 (Lothar Schanne)**

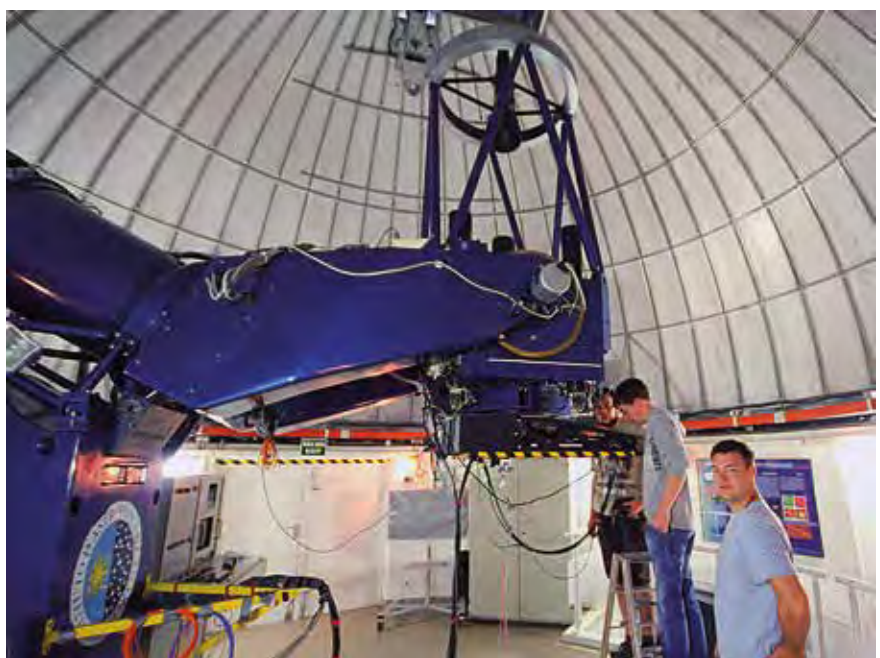
Ulrich Waldschläger hat zwei Zeitraffer einer Nacht am Teide-Observatorium erstellt. Sie können unter [3, 4] abgerufen werden.

Trotz Routine erlebten alle Teams verschiedene Überraschungen auf dem Berg. Diese waren u. a. eine private Führung am Sonnenteleskop GREGOR sowie die Lieferung frischer Törtchen aus Lissabon vom Folgeteam. Während unseres eigenen Aufenthalts entdeckten Knud und ich einen Spektroskopie-Neuling im Internetforum, der auf Teneriffa lebt. Der erhielt natürlich sofort eine Einla-

dung auf den Berg, brachte am nächsten Abend dann Kekse mit und entpuppte sich als überaus freundlicher und wissenschaftsbegeisterter Theologe – ich dachte, wir haben Georges Lemaître bei uns.

Immer wieder werde ich gefragt, was an solch einer Kampagne die wahre Herausforderung ist. Aus meiner persönlichen Sicht sind das drei Dinge:

Als Teilnehmer an einer professionellen Kampagne muss man bereit sein, allen Mitstreitern Vertrauen in die jeweilige Kompetenz entgegenzubringen. Da der Beobachtungsbetrieb im Wesentlichen



7

**Team 3 (Schüler und Studenten) in Aktion. v.l.n.r.: Daniel Küsters, Dennis Fuchs, Gerrit Grutzeck**

aus Standardprozeduren besteht, spielen spektroskopische Fachkenntnisse nur eine nachgeordnete Rolle. Vielmehr orientiert sich professionelle Arbeit hier eher an der Bereitschaft, besondere Anforderungen zu akzeptieren. Diese sind der geringe Spielraum für eigene Wünsche (man kann das Teleskop nicht allein lassen, um Deep-Sky-Aufnahmen zu machen), sich wiederholende Prozeduren (der Ort ist spektakulär, nicht aber die Arbeit am Computer) und die Fähigkeit, das gesamte Team im Blick zu haben (vor Ort repräsentiert man die ganze Gruppe). Erfolge werden geteilt, Misserfolge aber ebenfalls.

Als Organisator sollte man sich über den Arbeitsaufwand im Klaren sein. Sicherlich sind Reisen nach Nordamerika und Spanien, wie im vorliegenden Fall, nicht zwangsläufig nötig. Doch deutlich über 1.000 E-Mails reflektieren den Zeitaufwand ganz gut. Als Verantwortlicher für die ganze Gruppe gehen außerdem alle Probleme auf das persönliche Konto. Wenn man in einem internationalen

Team arbeitet, kommen potenziell nationale Eigenheiten ins Spiel, die in Dialogen (vor allem per E-Mail) berücksichtigt werden sollten. Profis sind mit nationalen Unterschieden aus täglicher Erfahrung vertraut. Amateure müssen das in der Regel erst lernen. Daher empfiehlt sich die obligatorische Teilnahme an einem Vorbereitungstreffen für alle Beobachter.

Man mag sich fragen, ob solch ein Aufwand für Amateurastronomen noch angemessen ist. Die Beteiligten unserer Kampagne bejahen diese Frage offenbar, hätten sie sonst eigene Zeit, Arbeit und nicht zuletzt Geld investiert? Ich persönlich ziehe meine Kraft aus den glänzenden Gesichtern vieler Beteiligter auf dem Berg. Sie spiegeln ganz außergewöhnliche Erfahrungen wider, die die meisten als spektakulären Bestandteil ihrer astronomischen Leidenschaft ansehen. Last but not least: Ein Urlaub im Fischtheken-Paradies ist auch nicht schlecht ...

#### Danksagung

Diesen Bericht habe ich stellvertretend für das gesamte ProAm-Teide-Team geschrieben. Mein Dank gilt daher allen Kolleginnen und Kollegen, die sich für unsere Arbeit eingesetzt haben und ohne die dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Dies gilt insbesondere für Berthold Stober, der uns seinen wertvollen Spektrografen zur Verfügung stellte, sowie für das gesamte IAC-Team auf Teneriffa (Alex Oscoz, Johan Knapen und alle Techniker & Nachtassistenten). Mein besonderer Dank geht jedoch an unsere jungen Schüler und Studenten, die mit ihrer unspektakulären und gelassenen Art beispielhaft am Teleskop gearbeitet haben.

#### Literatur- und Internethinweise:

- [1] *Sterne und Weltraum* 12/2009
- [2] *Sterne und Weltraum* 1/2013
- [3] [www.stsci.de/qr/Teide.wmv](http://www.stsci.de/qr/Teide.wmv)
- [4] [www.stsci.de/qr/Teide\\_Dome.wmv](http://www.stsci.de/qr/Teide_Dome.wmv)

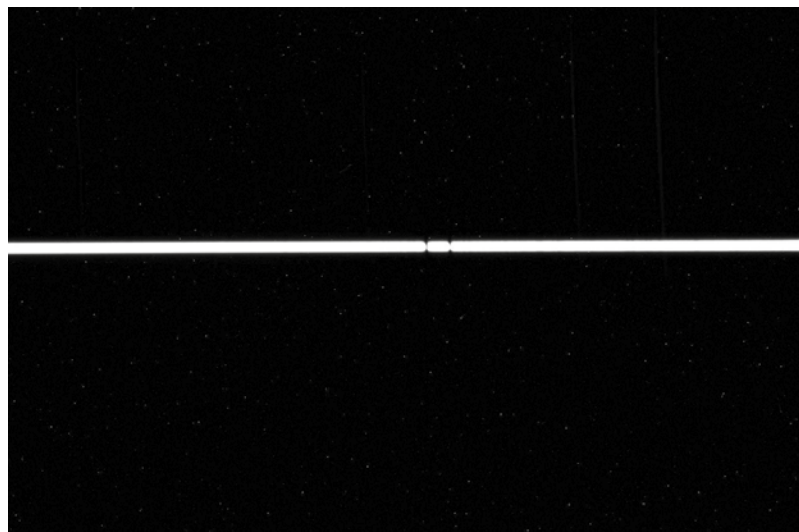
# Die Auswertung spektroskopischer CCD-Aufnahmen

## – Prinzipien der Datenreduktion

von Lothar Schanne

### – Teil 1 –

Die Aufnahmetechnik von Spektren von Himmelsobjekten ähnelt der normalen Deep-Sky-Fotografie. Man bildet die Licht emittierenden Objekte (Sterne, Nebel, Galaxien, etc.) auf einen CCD-Chip ab, wobei allerdings in den Strahlengang ein dispergierendes optisches Element eingefügt ist, das man in Kombination mit weiteren Elementen und der CCD-Kamera „Spektrograf“ nennt. Im einfachsten Fall ist das ein einfaches Transmissionsgitter („Staranalyser“) mit niedriger Dispersion. Früher hat man auch Objektivprismen vor der Teleskopöffnung verwendet. Heute ist der im Normalfall verwendete Spektrograf ein an das Teleskop angepasstes optisches System, das aus der sonst punktförmigen Abbildung eines Sterns durch die Zerlegung des Lichts



1

Unkorrigiertes CCD-Image mit dem Spektrumstreifen von eps Aur. Die beiden Fraunhofer-Linien Na D sind deutlich in Absorption erkennbar.

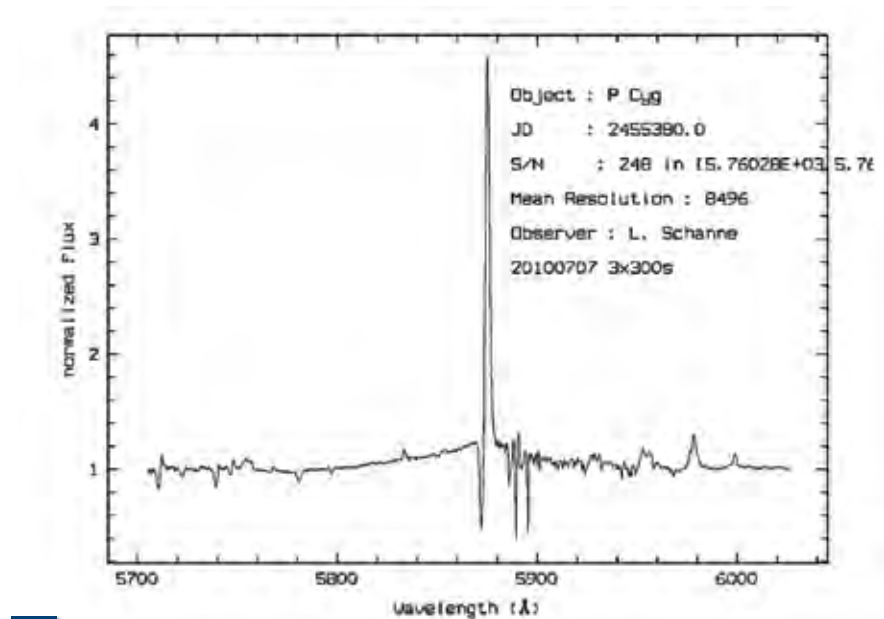
in die unterschiedlichen Wellenlängen in Dispersionsrichtung einen Strich erzeugt (Spektrumstreifen, vgl. Abb. 1). Die Breite des Streifens wird durch die üblichen Einflüsse definiert: Seeing, Abbildungsfehler, Fokussierung. Die Länge des Streifens ist bestimmt durch die Dispersion (Ångström/mm) des dispergierenden Elements des Spektrografen (Gitter, Prisma) und die Abbildungseigenschaften der Spektrografenoptik (Abbildungsmaßstab). Einen Überblick über den Aufbau und Selbstbau von Spektrografen findet der Leser in [1].

Wie in der normalen Himmelsfotografie müssen die CCD-Aufnahmen des Spektrums um verschiedene Einflüsse korrigiert werden: Dunkelstrom, Cosmics, heiße und kalte Pixel, Schatten durch Staub usw. Zusätzlich wird das Objektlicht durch die Erdatmosphäre verändert: Blaues Licht wird stärker gestreut, der Stern also „gerötet“, abhängig von seiner Höhe über dem Horizont. Wasser- und Sauerstoffmoleküle in der Luft absorbieren einen Teil des Sternlichts. Diese Absorptionsbanden und scharfen Absorptionslinien nennt man terrestrische Linien. Der Korrektur dieser Fremdeinflüsse kommt in der Spektroskopie eine große Bedeutung zu, denn die Spektren sollen möglichst fehlerfreie, quantitative Messungen des Objektlichts sein. Es geht hier nicht um Ästhetik, sondern um die lineare Abbildung des wellenlängenabhängigen Lichtflusses des Objekts auf ein Spektrum (vgl. Abb. 2), befreit von allen zufälligen und systematischen Fremdeinflüssen, soweit sie eliminierbar oder zumindest korrigierbar sind. Das Spektrum ist eine Auftragung des relativen oder absoluten Lichtflusses des Objekts gegen die Wellenlänge.

Noch ein Wort zu den geeigneten CCD-Kameras. In der Spektroskopie werden vorzugsweise monochrome CCDs (schwarzweiß) benutzt. Farb-CCDs besitzen eine Bayer-Matrix, welche im blauen und roten Bereich integral etwa 75 % und im grünen Wellenlängenbereich 50 % des auf das CCD fallenden Lichts absorbiert. Diese Lichtverschwendung kann man sich beim Spektroskopieren nur bei hellen Objekten leisten.

### Die Spektrumaufnahmen

Wegen der Streckung des punktförmigen Sternbilds zu einem langen Strich (Spek-



2

Normiertes Spektrum von P Cyg im Bereich 5.700 bis 6.020 Ångström

trumstreifen) wird die Flächendichte des Lichts auf dem CCD im Vergleich zur Fotografie (Dispersion = 0) erheblich „verdünnt“. Deshalb müssen generell Spektromaufnahmen viel länger belichtet werden als normale Sternfotos. Für einen Stern der Größenklasse 7 mag benötigt man mit einem Spektrografen mit einer Auflösung von  $R = 20.000$  und Teleskopen mit einer Öffnung von 10 bis 14 Zoll typischerweise ein bis zwei Stunden Belichtungszeit. Dies setzt eine gute Montierung und eine ausgefeilte Nachführtechnik voraus, denn das Sternbild im Fokus des Teleskops muss während der gesamten Belichtungszeit exakt auf dem Spektrografenspalt (oder bei spaltlosen Spektrografen an der gleichen Stelle des Bildfelds) gehalten werden.

Erfahrungsgemäß sind die Belichtungszeiten der einzelnen Aufnahmen unter 20 min zu halten, da sonst Cosmics auf dem Spektrumstreifen immer häufiger werden, welche umständlich zu korrigierende Fehler in das Spektrum einbringen. Die Gesamtbelichtungszeit wird zweckmäßigerweise in gleich lang belichtete Einzelaufnahmen von maximal 20 min aufgeteilt: man erstellt eine Aufnahmeserie. Bei hellen Objekten stellt sich dieses Problem natürlich nicht, weil dann kürzere Belichtungszeiten möglich werden.

Wie lange belichtet werden muss, ist auch eine Frage der für die Spektreninterpretation erforderlichen Genauigkeit (tolerierbarer Messfehler). Der Fluss be-

steht aus einzelnen Photonen, die einer Statistik unterliegen. Grob kann man sagen, dass der mittlere Fehler der gemessenen Intensität eines Pixels gleich der Wurzel aus der Anzahl der registrierten Photonen (= Elektronen) ist. Will man 1 % Genauigkeit erreichen, müssen pro Pixel rund 10.000 Photonen registriert werden. Für eine weitergehende Einführung siehe [2].

### Was ist in den Spektrumaufnahmen alles enthalten?

Zuerst einmal der Spektrumstreifen, aus dem Objektlicht erzeugt, wie es das CCD erreicht. Auf dem Weg vom Objekt durch den Raum bis zum CCD wird das ursprüngliche Licht des Objekts bereits modifiziert: Interstellare Materie (ISM) erzeugt spezifische Absorptionsbanden (Staub, Natrium) oder auch Emissionen (z. B.  $H\alpha$  oder verbotene Linien aus Emissionsnebeln), die Erdatmosphäre prägt ihre terrestrischen Absorptionen auf (Wasserlinien,  $O_2$ -Banden) und streut das Licht an Molekülen und Partikeln. Das gemessene Spektrum ist also ein modifiziertes und kein absolutes Spektrum des ursprünglich emittierten oder reflektierten Lichts des Beobachtungsobjekts. Einige dieser Einflüsse lassen sich näherungsweise korrigieren, z. B. die terrestrischen Linien.

Zu diesen direkten (unvermeidlichen) Effekten auf das Objektlicht kommen noch die apparativen Einflüsse, welche den Spektrumstreifen modifizieren und als Störsignale aufgefasst werden können.

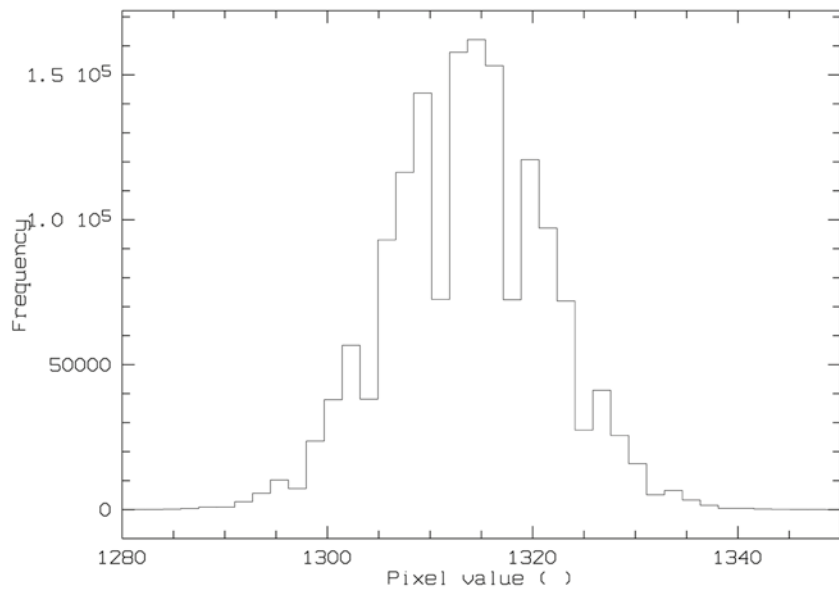
Dies sind vor allem die Unzulänglichkeiten des CCD und seiner peripheren Elektronik.

### Bias

Jede CCD-Aufnahme enthält kameraspezifisch in jedem Pixel ein konstantes Mindestniveau an Signal, das aus technischen Gründen beim Auslesen der Pixel erzeugt wird, damit kein Pixel zufällig einen Wert unter Null annehmen kann. Dieser Signalsockel, genannt Bias, muss aus den Spektromaufnahmen entfernt werden. Er wird gemessen durch Aufnahmen ohne Lichteinfall (geschlossener Verschluss) bei möglichst kurzer Belichtungszeit ( $< 1$  s). In den Bias-Aufnahmen (im Folgenden einfach Bias genannt) sollten alle Pixel etwa den gleichen Wert aufweisen. Die Standardabweichung des Bias-Wertes der Pixel sollte möglichst gering sein. Bei meiner CCD-Kamera (Sigma 1603 ME) beträgt diese Streuung um den Bias-Mittelwert von 1.313 ADU ca.  $\pm 7,5$  ADU. Dies ist ein wichtiges Qualitätskriterium der jeweiligen Kamera. Es sollten auch keine Pixel dramatisch aus der Reihe fallen, die Verteilung der ADU der Pixelmatrix in einem Histogramm etwa gaußkurvenförmiges Profil haben (Abb. 3). Das Bias ist bei der Datenreduktion aus den Sternspektrenaufnahmen durch einfache Subtraktion eliminierbar.

### Dunkelstrom

Jedes Pixel produziert durch thermisches Rauschen Elektronen, welche eingefallene Photonen (Licht vom Objekt) vortäuschen. Diese Dunkelstromrate in Elektronen/s ist stark temperaturabhängig. Um sie möglichst klein zu halten, wird der CCD-Chip bei den für astronomische Zwecke hergestellten CCD-Kameras gekühlt. Bei Amateurgeräten durch ein- oder zweistufige Peltierelemente (20 bis 50 °C unter Umgebungstemperatur), in professionellen Kameras mit flüssigem Stickstoff (-180 °C) oder vielstufigen Peltierelementen. Der in einer konkreten Aufnahme enthaltene Dunkelstrom ist proportional der Belichtungszeit und exponentiell von der Temperatur abhängig. Deshalb ist eine gute Temperaturregelung für den CCD-Chip wichtig ( $\pm 0,1$  °C). Und die CCD-Kamera sollte auch im Sommer -20° erreichen können (2 Peltierstufen). Die Güte der Temperaturregelung und die erreichbare Temperatur unter der Umgebungstemperatur sind



3

Histogramm eines Bias, aufgenommen mit einer Sigma 1603 ME bei -30 °C

wichtige Qualitätskriterien der jeweiligen CCD-Kamera.

Nun ist die Dunkelstromrate nicht für alle Pixel gleich. Einige produzieren mit einer hohen Rate thermische Elektronen, sie werden „heiße Pixel“ genannt. Sie sind im dunklen Hintergrund als ein(!)pixelige weiße Flecken sichtbar. Der Dunkelstrom der Pixel (auch der heißen Pixel) muss im Verlauf der Datenreduktion aus den Spektromaufnahmen eliminiert werden.

Um den Dunkelstrom und das Bias aus den Spektromaufnahmen durch Subtraktion entfernen zu können, werden ausreichend viele Darkimages mit der gleichen Belichtungszeit und der gleichen CCD-Temperatur wie beim Objektspektrum aufgenommen. Wie viele Darkaufnahmen nötig sind, ergibt sich aus statistischen Überlegungen [2]. Auf jeden Fall sollte die Standardabweichung des Mittelwerts der Darkserie (mittleres Dark) um ein Vielfaches geringer sein als der statistische Fehler des Mittelwerts der Spektromaufnahmen im Bereich des Spektrumstreifens. Ansonsten werden durch die Korrekturen zusätzliche statistische Fehler in das Endergebnis, das Spektrum, eingeschleppt. Dies gilt für alle in der Datenreduktionsroutine verwendeten Korrekturaufnahmen. Dies ist umso wichtiger, je verrauschter die Spektrenaufnahmen sind, was insbesondere bei lichtschwachen Objekten vorkommt.

### Ausleserauschen

Beim Auslesen der Pixelinhalte durch die Elektronik der CCD-Kamera kommen noch weitere Rauscheffekte hinzu, die man Ausleserauschen nennt. Es ist deshalb sinnvoll, möglichst kleine Aufnahmeserien zu machen und dafür die Belichtungszeiten der Einzelaufnahmen zu verlängern, um die Anzahl der Auslesevorgänge zu minimieren.

Dabei muss allerdings ein Kompromiss gefunden werden, weil mit hoher Belichtungszeit die Anzahl der Cosmics und die Auswirkungen heißer Pixel zunehmen. Die besten Werte sind auszuprobieren. Nach meinen Erfahrungen sind 10 min ein guter Kompromiss.

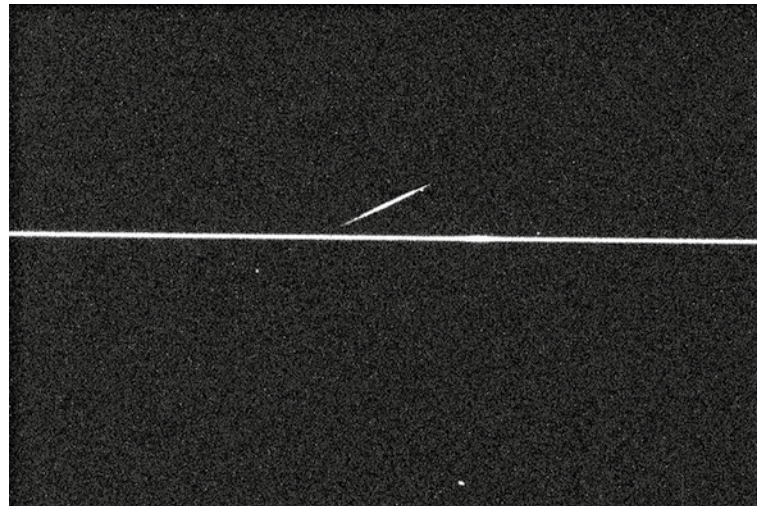
Nach diesen grundsätzlichen Erwägungen ist auch einsichtig, warum es wichtig ist, den Spektrumstreifen möglichst schmal zu machen, also optimal zu fokussieren. Eine unscharfe Abbildung verbreitert den Spektrumstreifen, verteilt dadurch das zur Verfügung stehende Licht auf unnötig viele Pixelzeilen und verschlechtert somit die Photonenzählstatistik. Und jedes Pixel bringt in das Messergebnis, das Spektrum, dazu noch seine spezifischen statistischen Schwankungen ein, sei es durch Bias, Dunkelstrom oder Ausleserauschen.

### Cosmics

Auf der belichteten CCD-Fläche finden sich weitere Störkomponenten, die nicht

vom Sternlicht stammen. Die Cosmics (runde Flecken oder längliche weiße Streifen) werden erzeugt durch Partikel- und weitere Arten von Strahlung. Sie sind zufällig verteilt und bei jeder CCD-Aufnahme anders. Sie unterscheiden sich von heißen Pixeln durch ihre Größe und ihre zufällige Lage auf dem Chip. Es sind meist viele Pixel von einem Cosmic betroffen (Abb. 4). Je länger die Belichtungszeit gewählt wird, desto mehr Cosmics werden wahrscheinlichsbedingt vorhanden sein. In der spektroskopischen Praxis sind sie der Belichtungszeit begrenzende Faktor. Es dürfen innerhalb des Spektrumstreifens keine Cosmics enthalten sein. Sie verursachen Artefakte, die im ausgewerteten Spektrum wie Emissionslinien aussehen. Und sie sind nur aufwendig eliminierbar.

In Teil 2 dieses Beitrags werden weitere Störeffekte vorgestellt (Streulicht, Schmutzeffekte, Himmelshintergrund) und die Techniken zu ihrer Eliminierung behandelt. Danach wird die eigentliche Reduktion der zweidimensionalen korri-



4

**Neben dem Spektrumstreifen von zet Tau ( $H\alpha$ -Emission im Streifen erkennbar) befindet sich eine besonders lange und intensive Spur (Cosmic), die aber den Spektrumstreifen nicht stört. Es sind noch weitere, runde Cosmics sichtbar.**

gierten Spektrum-Summenaufnahme zu einem eindimensionalen Spektrum (vgl. Abb. 2) thematisiert.

*Hinweise auf Internetlinks:*

[1] *Homepage der Fachgruppe Spektro-*

*skopie in der VdS: <http://spektroskopie.fg-vds.de/>, Menüpunkt „Spektrographen“, Stand Januar 2014*

[2] *L. Schanne: [www.astrospectroscopy.eu/Einsteiger/SN/SN.htm](http://www.astrospectroscopy.eu/Einsteiger/SN/SN.htm), Stand Januar 2014*

# Fotometrie und Spektroskopie der Nova Delphini 2013

von Erik Wischnewski

Die Nova Delphini 2013 bot die günstige Gelegenheit, bei milden sommerlichen Temperaturen in den Abendstunden die Nova zu beobachten. Dabei ging es neben der Erstellung einer Lichtkurve vor allem darum, herauszufinden, welche wissenschaftlichen Ergebnisse mit einem optimal eingesetzten StarAnalyser100 erreicht werden können. Die vollständigen und ausführlich diskutierten Ergebnisse sind in [5] zusammengestellt und sollen hier in angemessener Kürzung präsentiert werden.

## Lichtkurven

– Belichtung:

Zur Ermittlung der Lichtkurven in B, V und R wurde eine Canon EOS 60Da mit dem Teleobjektiv Canon EF 200 mm f/2,8L II USM verwendet. Die Belichtung erfolgte bei ISO 200-400 mit 5-10 s und Blende 2,8.



1

**Canon EOS 60Da mit EF 200 mm f/2,8L auf einem 3D-Neigekopf an der Deklinationsachse einer parallaktischen Montierung mit motorischer Nachführung**

– Reduktion und Fehler:

Die B- und V-Helligkeiten wurden durch Ausgleichsrechnung anhand von neun Vergleichssternen, für die Johnson-Hel-

ligkeiten vorlagen, ermittelt. Der mittlere Fehler der Einzelmessungen liegt für B bei 0,09 mag und für V bei 0,07 mag. Der mittlere Fehler der R-Helligkeit



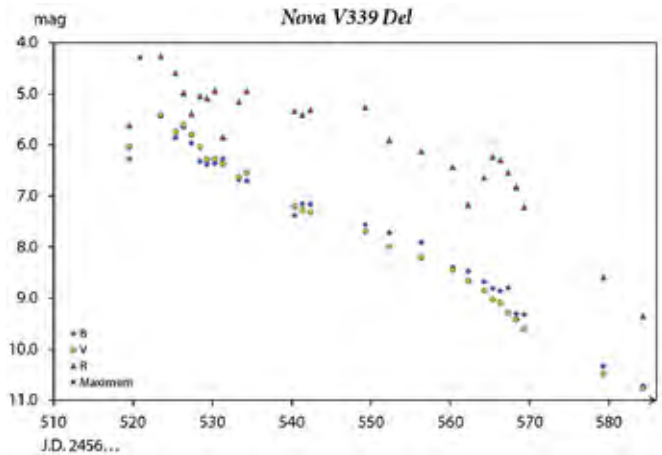


- 2** Instrumenteller Aufbau des Spektrografen mit Okularauszug, Verbindungsadapter mit eingesetztem Gitter, Distanzhülse und DSLR-Kamera. Die Position des Gitters ist markiert. Die Projektionsdistanz beträgt 155 mm.

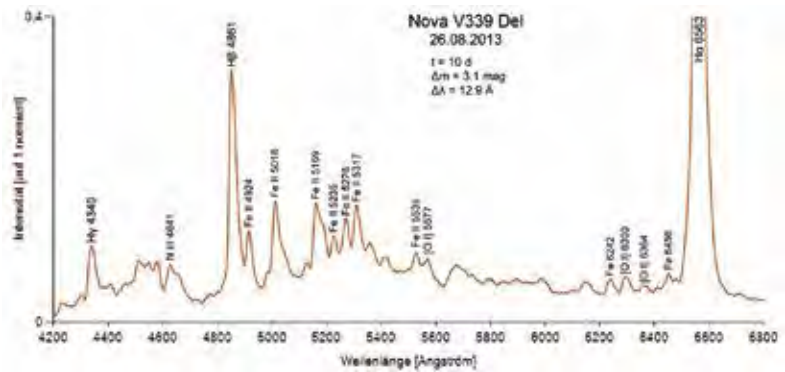
liegt bei 0,18 mag. Leider liegen hier nur fünf Vergleichshelligkeiten vor. Speziell bei Novae ist wegen der starken Linienemission eine Farbkalibrierung sehr problematisch; folglich wurde hierauf verzichtet.

Auffallend ist, von zwei Ausreißern nach unten abgesehen, dass die R-Helligkeit von RJD 526–534 konstant bleibt (Abb. 3). Außerdem scheint es um RJD 550 und bei RJD 560–570 Schwankungen zu geben, die vermutlich real sind. Die R-Helligkeit wird hauptsächlich durch  $H\alpha$  bestimmt.

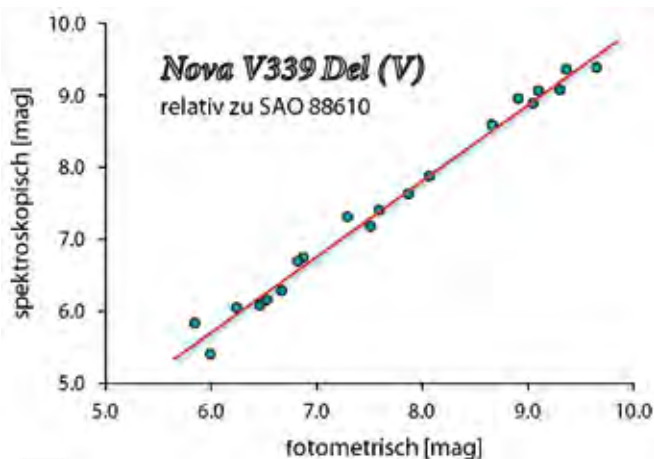
– Absolute Helligkeit:  
Aus der Lichtkurve für V lassen sich die Zeiten  $t_2$  (Helligkeit um 2 mag gefallen) und  $t_3$  (Helligkeit um 3 mag gefallen) ab-



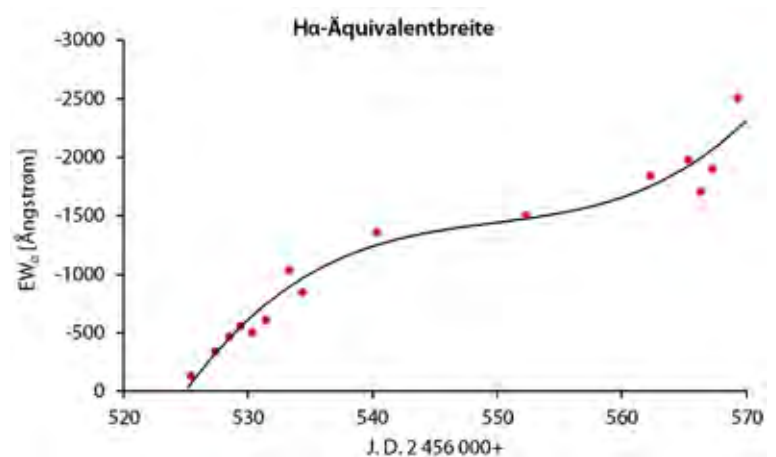
- 3** Lichtkurven der Nova V339 Del, das Kreuz markiert das Maximum der scheinbaren visuellen Helligkeit (gemäß AAVSO), im Text wird RJD = JD-2456000 verwendet.



- 4** Spektrum der Nova V339 Del am 26.08.2013, 10 Tage nach dem Maximum bei  $\Delta m = -3,1$  mag (spektrale Auflösung  $\Delta\lambda = 13$  Å). Die Intensität wurde auf 1 normiert und wird von  $H\alpha$  erreicht. Deutlich erkennbar sind neben der Balmer Serie auch die FeII- und [OI]-Linien. Die Nova gehört damit zum Typ FeII-Novae.



- 5** Vergleich der fotometrisch bestimmten V-Helligkeit und der aus dem Spektrum integrierten Johnson-Helligkeit (Referenzstern: SAO 88610)



- 6** Zeitliche Entwicklung der  $H\alpha$ -Äquivalentbreite

leiten. Laut AAVSO liegt das Maximum bei RJD 520,95 und  $V = 4,3$  mag. Es ergeben sich  $t_2 = 9$  Tage und  $t_3 = 21$  Tage. Nach [1] ergibt sich aus  $t_2$  eine absolute visuelle Helligkeit  $M_v$  von  $(-8,46 \pm 0,41)$  Mag. Nach [2] errechnet sich aus  $t_3$  ein Wert von  $M_v = -8,63 \pm 0,73$ . Das gewichtete Mittel beträgt  $M_v = -8,5 \pm 0,4$ .

#### – Leuchtkraft und Radius:

Die Leuchtkraft im Maximum wird auf  $L_{\text{Max}} = (200.000 \pm 80.000) L_{\odot}$  ( $\approx 10^{39}$  erg/s) geschätzt. Innerhalb der ersten neun Wochen wurden somit  $\approx 10^{45}$  erg abgestrahlt. Der Leuchtkraft entspricht unter der Annahme einer effektiven Temperatur von 9.000 K [3] nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ein maximaler Radius des Feuerballs von  $184 R_{\odot} = 0,86$  AE.

#### – Entfernung der Nova:

Aus der absoluten und der scheinbaren visuellen Helligkeit ergibt sich unter Berücksichtigung der interstellaren Absorption von 0,55 mag [4] eine Entfernung der Nova von  $d = (2.900 \pm 450)$  pc =  $(9.200 \pm 1.400)$  Lj.

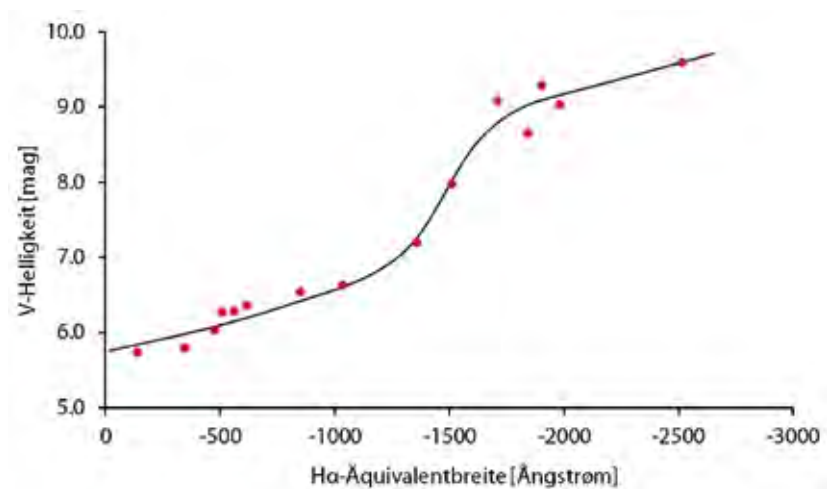
### Spektr

#### – Aufbau des Spektrografen:

Zur Gewinnung der Spektren wurde das Blazegitter StarAnalyser mit 100 Linien/mm spaltlos prefokal (wie ein Farbfilter) direkt in den Strahlengang eines 127 mm/950 mm-Apochromaten vor die Canon EOS 60Da (Pixelgröße = 4,3  $\mu\text{m}$ ) eingesetzt. Anfänglich betrug der Abstand Gitter-Sensor 139,5 mm, zum Schluss wurde er mittels optimierter Distanzhülsen auf 155 mm vergrößert. Damit erreichte ich eine lineare Dispersion von 3,1  $\text{\AA}/\text{Pixel}$  bzw. 2,8  $\text{\AA}/\text{Pixel}$ . Weil das Gitter spaltlos verwendet wird, bestimmt die Luftunruhe (Seeing) die spektrale Auflösung. Hinzu kommen weitere Effekte (z. B. durch das Stacking der Aufnahmen). Als Maß für die Auflösung wurde die Halbwertsbreite (FWHM in Pixel) der nullten Ordnung (auch als Stern bezeichnet) verwendet. Während der Messperiode wurden Werte von 10-21  $\text{\AA}$  (im Mittel 15  $\text{\AA}$ ) erreicht.

#### – Belichtung der Spektren:

Die Aufnahmen wurden vorzugsweise mit ISO 800 und 4 s belichtet, ab 03.09.2013 in einigen Fällen auch mit ISO 1.600 und 8-10 s. Es wurde versucht, die  $H\alpha$ -Linie ungesättigt zu halten, was



7

Korrelation zwischen V-Helligkeit und  $H\alpha$ -Äquivalentbreite

in drei Fällen (RJD 541, 542 und 549) nicht gelang (Überbelichtung erst nach Abbau entdeckt). Zur Reduzierung des Rauschens wurden anfänglich 40-60 Bilder addiert und ab 28.09.2013 sogar 80-100 Aufnahmen.

#### – Kalibrierung der Wellenlänge

Zur Kalibrierung wurde der F2-Stern SAO 88610, der sich neben der Nova auf allen Aufnahmen befand, verwendet. Es konnte in den meisten Fällen eine parabolische Kalibrierung durchgeführt werden. Es wurde versucht, die Zentralwellenlängen auszuwerten, um eine mögliche Radialgeschwindigkeit nachzuweisen. Leider reichte die spektrale Auflösung hierfür nicht aus. Zudem war der mittlere Fehler der Messungen größer als eine mögliche Radialgeschwindigkeit.

#### – Helligkeit:

Mit Hilfe des eigenen Programms proMath wurden anhand hinterlegter Johnson-Kennlinien die Intensitäten zu B-, V- und R-Helligkeiten integriert. Dabei weist die V-Helligkeit eine gute Korrelation (Steigung = 1,054, Korrelationskoeffizient = 0,9936) zur klassischen Fotometrie auf (Abb. 5).

#### – Äquivalentbreite:

Die Helligkeit ist der Strahlungsfluss eines bestimmten Wellenlängenbereiches und errechnet sich als Integral der Intensität. Das gilt nicht nur für Farbbereiche wie B oder V, sondern auch für einzelne Linien wie  $H\alpha$ . Im Falle der Nova wird hier der Bereich 6505-6650  $\text{\AA}$  verwendet.

Normiert man diesen Linienfluss auf das Kontinuum im Bereich der Linie ( $I_c = 1$ ), so erhält man die Äquivalentbreite EW der  $H\alpha$ -Linie. Zum einen ist die zeitliche Entwicklung (Abb. 6) und zum anderen die Korrelation zur visuellen Helligkeit V (Abb. 7) interessant.

Dass die Kurven in den Abbildungen 6 und 7 ähnlich verlaufen, verwundert insofern nicht, als dass die Nova im Laufe der Zeit dunkler wird (im Postmaximum). Insofern ist eine Helligkeitsachse auch gleichzeitig eine Zeitachse und umgekehrt.

#### – Expansion:

Ebenfalls konnte die Halbwertsbreite FWHM der  $H\alpha$ -Linie relativ gut gemessen werden. Diese gibt man üblicherweise nicht in Angström ( $\text{\AA}$ ), sondern in km/s an.

Bei einer spektralen Auflösung von 10-21  $\text{\AA}$  ist also eine Geschwindigkeitsauflösung von ca. 500-1.000 km/s zu erwarten. Die Halbwertsbreite wurde mittels Gaußfit berechnet und von der instrumentenbedingten Linienverbreiterung bereinigt.

In der Abbildung 8 ist gut zu erkennen, wie die Expansion des  $H\alpha$ -Emissionsgebietes langsamer wird. Die Expansion erreichte zum Zeitpunkt des visuellen Maximums mit 1.800 km/s ihre höchste Geschwindigkeit und nahm im Laufe der nächsten sieben Wochen auf 1.200 km/s ab.

### – Hülle:

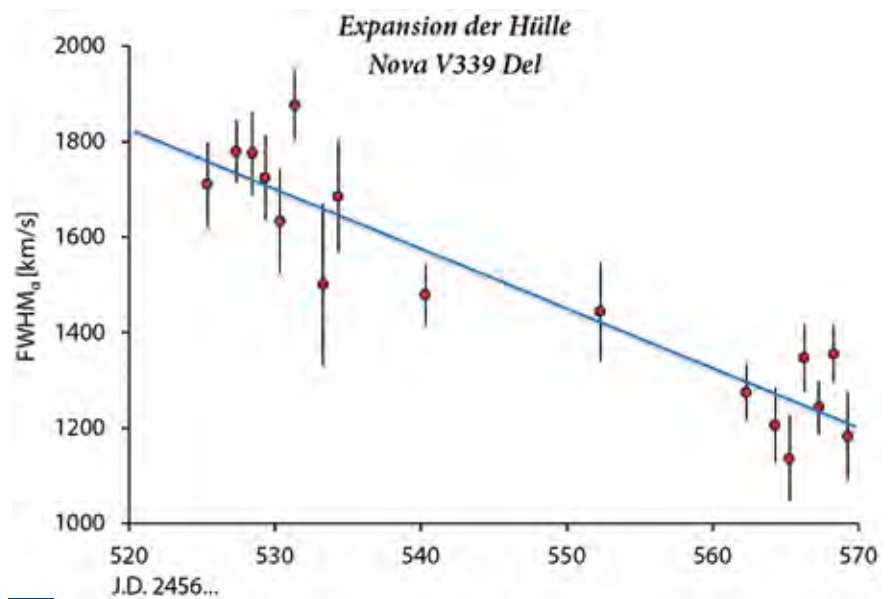
Mit dem Erreichen des Helligkeitsmaximums erreicht auch der Feuerball (Photosphäre der Nova) seine größte Ausdehnung. Danach schrumpft die Photosphäre wieder, was sich in der Lichtkurve bemerkbar macht. Innerhalb dieser Region ist die Hülle undurchsichtig (optisch dick). Im Postmaximum baut sich nun aber durch die Sternwinde gleichzeitig eine optisch dünne Hülle auf, die nach außen hin expandiert. Diese bewirkt mit (zunächst) wachsender Tendenz eine zirkumstellare Absorption.

Der Ehrgeiz des Verfassers ging nun soweit, auch diese mit dem einfachen Spektrografen nachweisen zu wollen. Aus dem Balmerdekrement lässt sich die Gesamtabsorption berechnen, aus der nach Abzug der interstellaren Absorption die zirkumstellare Absorption übrigbleibt (die atmosphärische Extinktion ist bereits bei der Ermittlung des Balmerdekrements eliminiert worden).

Kurz nach dem Maximum, wo sich noch keine nennenswerte optisch dünne Hülle aufgebaut hat, liegt das Dekrement nahe dem theoretischen Wert von  $D = 2,8$  (Abb. 9). Bei RJD 570 hat sich das Dekrement auf  $D = 8 \pm 2$  erhöht. Das entspricht nach [5] einer Gesamtabsorption von  $AV = (2,9 \pm 0,7)$  mag. Subtrahiert man davon die interstellare Absorption von knapp 0,6 mag [4], so erhält man eine zirkumstellare Absorption von  $(2,3 \pm 0,7)$  mag. Das heißt, sieben Wochen nach dem Maximum verlässt nur ein kleiner Bruchteil der Photosphärenstrahlung den Bereich der Nova auf direktem Wege. Ein Großteil der absorbierten Strahlung kommt über angeregte Emissionslinien der Hülle zu uns, z. B. in Form der verbotenen Sauerstofflinien.

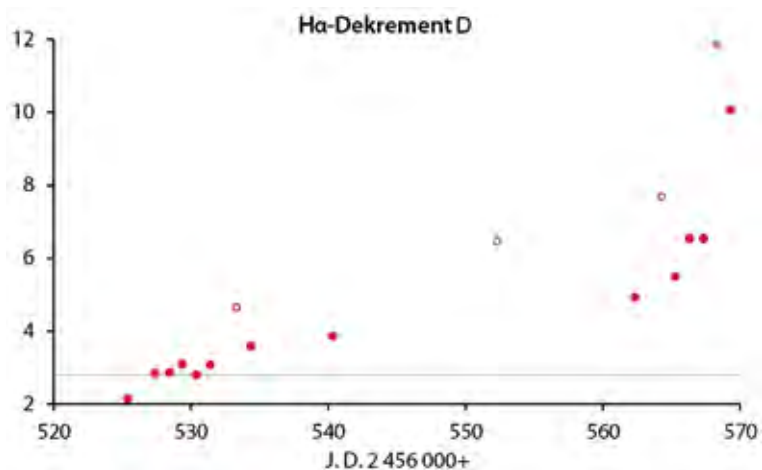
### Schlussgedanke

Mit ein wenig Mut zu Neuem lässt sich mit dem preiswerten StarAnalyser 100 und einer  $H\alpha$ -empfindlichen Kamera sehr viel erreichen. Es muss allerdings auch eingeschränkt werden, dass Novae (und vermutlich auch eine Supernovae) wahrhaft reichhaltige Informationslieferanten sind. Bei einer Nova tut sich binnen weniger Tage und Wochen so viel, dass es weniger das Equipment ist, das einem das Vergnügen vergönnen möchte, als vielmehr das Wetter zu genau



8

Zeitliche Entwicklung der Expansionsgeschwindigkeit des  $H\alpha$ -Emissionsgebietes



9

Zeitliche Entwicklung des flusskalibrierten Balmerdekrements für  $H\alpha$

dieser Zeit. Mit einem Remote-Teleskop allein ist es hier nicht getan. Es müsste schon fest als Spektrograf aufgebaut sein, mit dem StarAnalyser 100 oder 200 und einer passenden DSLR.

#### Literaturhinweise:

- [1] J. G. Cohen, 1988: "Nova Expansion Parallaxes", *Astron. Soc. Pacific* 4, 114
- [2] R. A. Downes, H. W. Duerbeck, 2000: "Optical Imaging of Nova Shells and the Maximum Magnitude-Rate of Decline Relationship", *Astron. J.* 120, 2007
- [3] M. Friedjung, H. W. Duerbeck,

1993: "Models of Classical Recurrent Novae", *Nation. Assoc. Sec. School Princ.*, 371

- [4] M. M. Santangelo et al., 2013: "Distance of nova Del 2013 from MMRD relations", *Astronomer's Telegram* No. 5313
- [5] E. Wischnewski, 2014: „Helligkeit und Spektrum der Nova V339 Del“, *Astronomical Bulletin Wischnewski* No. 12