

Penumbren hinzu, deren Anzahl dank 40 mm Öffnung je nach Aktivität überschaubar gering ist (siehe Abb.3).

Das Ergebnis kommt meinem Bild-Erleben im PST erstaunlich nahe und zeigt dank Belichtung in Auge und Kopf ein Miteinander von Protuberanzen, Filamenten und Plages. Vervollständigt mit diversen Daten ist dies eine nicht allzu aufwändige alternative Bilddokumentation. Klemmblock, Tonpapierrohlinge und ein paar Buntstifte passen zusätzlich in meine PST-Tasche. Fantastisch!

Literaturhinweise:

- [1] P. Völker, P 2008.: „Die H-Alpha-Relativzahl“, *interstellarum* 57, April/Mai 2008
- [2] K. Reinsch, et al., 1999: „Die Sonne beobachten“, Verlag Sterne und Weltraum, 1999
- [3] J. Banisch, 2009: „Die Sonne“, Verlag OCULUM Astro-Praxis, 2009



3

Zeichnung der Sonne im PST 40 mm/400 mm, Vergrößerung 27x, H-Alpha und Weißlicht; 08.08.2014, 12:19-12:37 Uhr MESZ

Die Auswertung spektroskopischer CCD-Aufnahmen (Prinzipien der Datenreduktion)

von Lothar Schanne

– Teil 3 –

Im ersten und zweiten Teil (Hefte 50 und 51) wurden die Komponenten in einer Spektrum-CCD-Aufnahme vorgestellt. Neben dem Spektrumstreifen, der eigentlichen Messgröße, gibt es Artefakte, die vor der Extraktion des Spektrums möglichst quantitativ eliminiert werden sollen. Behandelt wurden Bias, Dunkelstrom, Ausleserauschen, Cosmics, Streulicht, Vignettierungen und Himmelshintergrund. Außerdem wurde der Zweck von Objektaufnahmen, Darks, Flats und Kalibrierspektrumaufnahmen vorgestellt. Im vorliegenden Teil 3 wird auf die Vorbereitung der Aufnahmeserien zur eigentlichen Datenreduzierung eingegangen.

Sichtung der zur Auswertung bestimmten Dateien

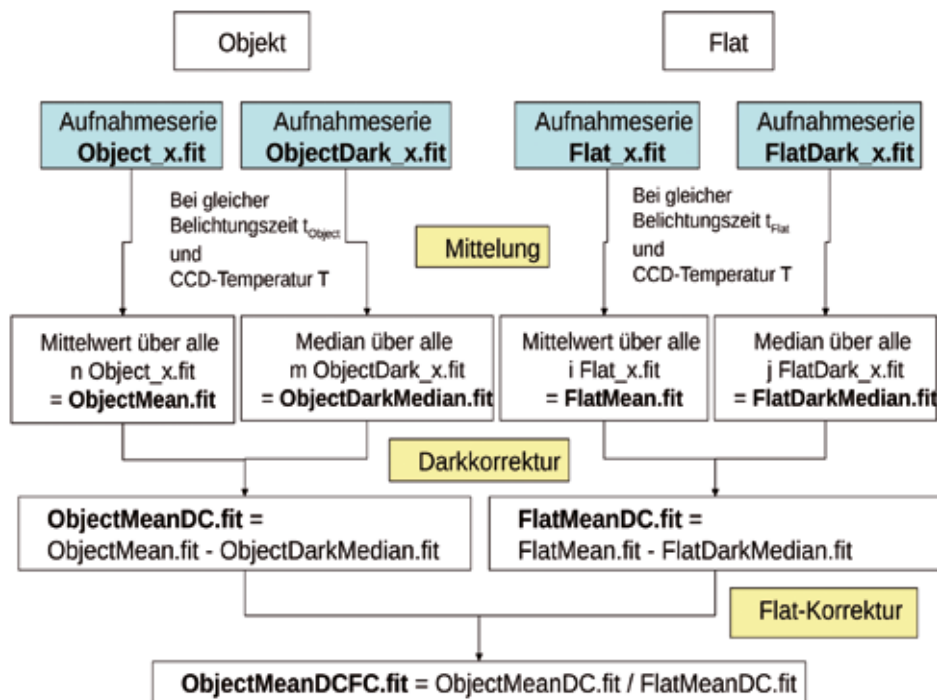
Die Flats, Darks und Objektimages sollten einzeln am Bildschirm zur Kontrolle auf Fehler durchgesehen werden. Aus-

lesefehler der Kameraelektronik sind sehr selten, aber nicht ausgeschlossen. Normalerweise sind auch Cosmics im Spektrumstreifen der Objektimages eher selten. Falls man bei der Durchsicht der Images solche Cosmics entdeckt, muss man sich entscheiden, ob man die Datei verwirft oder korrigieren will. Ich habe mich immer zum Verwerfen entschieden. Hat man eine stabile Montierung und ein gutes Autoguiding, kann man bei Spaltspektrografen normalerweise auf ein Stacking der Aufnahmen verzichten. Sie sind im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit deckungsgleich. Bei spaltlosen Spektrografen ohne Autoguiding wird man generell zuerst mit einem geeigneten Programm stacken müssen. Dabei kann man sich prägnanter Absorptionslinien im Spektrumstreifen als Erkennungsmuster bedienen. Nachfolgend werden gestackte bzw. deckungsgleiche Aufnahmen vorausgesetzt, die einfach gemittelt werden können.

Mitteln der Aufnahmen und anschließende Dark- bzw. Flat-Korrektur

Man bildet den Median der den Objektaufnahmen zugeordneten Darks und erhält das ObjectDarkMedian.fit (die korrigierten und gemittelten Dateien erhalten wegen der besseren Übersichtlichkeit charakteristische Bezeichnungen). Damit hat man dann ein Dark, das den mittleren Bias und Dunkelstrom bei der gegebenen Belichtungszeit und CCD-Temperatur enthält. Der Median ist im Falle der Darks besser als ein Mittelwert, weil der Mittelwert die anteiligen Reste der Cosmics der Einzelaufnahmen enthält, die im Median nicht auftauchen. Der Median ist in dieser Hinsicht robuster als der Mittelwert.

Ebenso bildet man den Mittelwert der Objektaufnahmen und erhält das ObjectMean.fit. Damit hat man dann ein Objektbild, das die mittlere Intensität



1 Schema: Vorbereitung der Aufnahmeserien zur weiteren Datenreduktion

der Pixel inkl. mittlerer Bias und Dunkelstrom bei der gegebenen Belichtungszeit und CCD-Temperatur enthält. Zur Eliminierung von Bias und Dunkelstrom zieht man vom ObjectMean.fit das ObjectDarkMedian.fit ab und erhält das ObjectMeanDC.fit (DC wie dark corrected).

Vom Kalibrierspektrum zieht man lediglich ein Bias ab. Für die Kalibrierspektren braucht man normalerweise nur kurze Belichtungszeiten im Sekundenbereich, weshalb das Bias reicht. Falls man lang belichtete Kalibrierspektren erzeugt, sollte man zur Erhöhung des Kontrasts ein

gleich lang belichtetes Dark abziehen. Will man das Spektrum mit einem Flat korrigieren, muss die Flatserie gemittelt und vom berechneten FlatMean.fit ein FlatDarkMedian.fit abgezogen werden. Das Resultat ist das FlatMeanDC.fit. Das korrigierte Objektmittel ObjectMeanDC.fit wird dann durch das korrigierte Flatmittel FlatMeanDC.fit geteilt und man erhält das ObjectMeanDCFC.fit. Die Vorgehensweise ist in einem Flowsheet zusammengfasst. Der Leser möge die umständlichen Dateinamen entschuldigen. Aber dadurch wird Klarheit erreicht. Vgl. dazu auch die Abbildung 1.

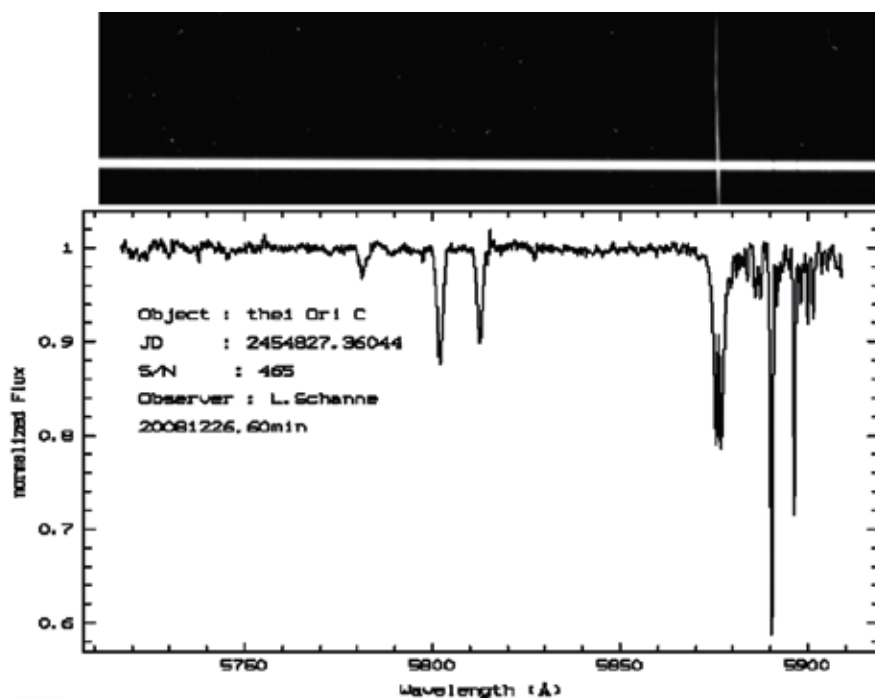
Himmels-hintergrund-Korrektur

Die berechnete Datei ObjectMeanDC.fit (bzw. nach Flatkorrektur die Datei ObjectMeanDCFC.fit) enthält noch den Himmels-hintergrund. Kann man für den Himmels-hintergrund annehmen, dass ein linearer Gradient in den Pixel-spalten vorhanden ist, dann genügt es, beidseitig des Spektrumstreifens symmetrisch je ein gleich großes Rechteck der Pixel-fläche über die Spalten zu mitteln und den Betrag spaltenweise abzuziehen. Es gibt auch komplexere Methoden, welche nichtlineare Gradienten des Himmels-hintergrunds spaltenweise als Funktion fitten und dann den Himmels-hintergrund für jedes Pixel berechnen (interpolieren). Die zur Verfügung stehenden Methoden hängen von der benutzten Software ab.

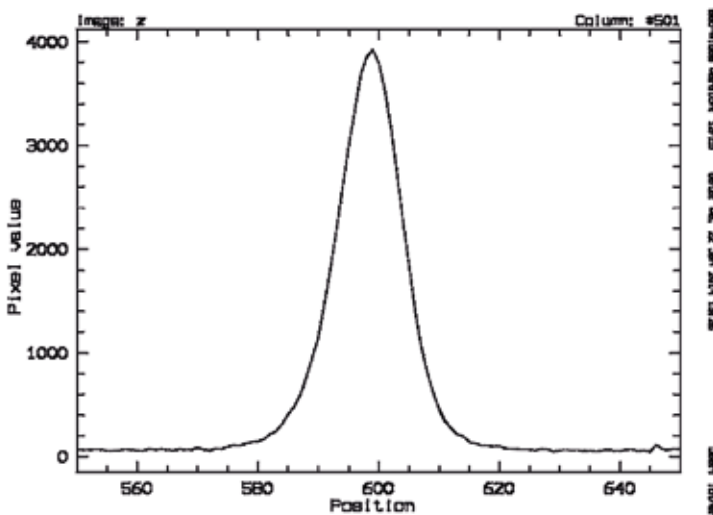
Die Himmels-hintergrundkorrektur versagt bei Objekten, für die der Hintergrund in einzelnen Wellenlängenbereichen oder Linien stark und ungleichmäßig verteilt ist, also insbesondere im Fall von Emissionsnebeln. In diesem Fall ist der Himmels-hintergrund nicht realistisch interpolierbar und es verbleiben nach der Datenreduktion in den Spektren Artefakte.

Ein Beispiel zeigt die Abbildung 2. Der Trapezstern Theta 1 Ori C liegt ziemlich im Zentrum des Orionnebel. Entsprechend stark sind die Emissionslinien des Nebels in Spektromaufnahmen vorhanden.

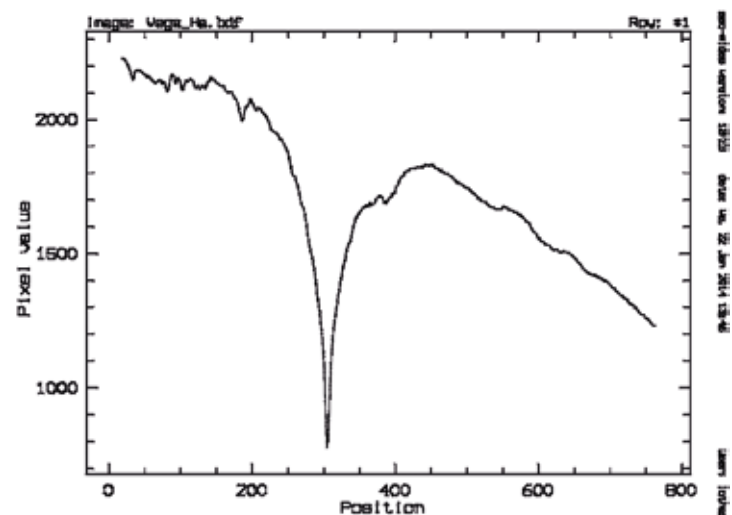
Der Spektralbereich um 580 nm zeigt eine Emissionslinie des Nebels, die quer über den Spektrumstreifen des Sterns verläuft und nichts anderes ist als eine Abbildung des Spalts im diskreten Licht der He-I-5876-Linie. Gleich rechts davon erkennt man im Spektrumstreifen des Sterns das



2 Versagen der Himmels-hintergrundkorrektur bei Anwesenheit von Emissionslinien eines Nebels (oben korrigierte Spektromaufnahme von Theta 1 Orionis C, unten das Spektrum nach Reduktion und Wellenlängenkalibrierung).



3 Spaltenprofil eines horizontal liegenden Spektrumstreifens zur Ermittlung des Spalten-Integrationsintervalls für die Spektrumextraktion



4 Beispiel eines 1d-Rohspektrums, wie es nach der Extraktion des Spektrumstreifens vorliegt

Na-Dublett (Absorption verursacht durch interstellares Natrium). Obwohl der Himmelshintergrund abgezogen wurde verbleibt in der He-I-5876-Absorptionslinie des Sterns mittig ein Rest der Emission des Nebels, der bei der linearen Himmelshintergrundinterpolation nicht eliminiert wurde. Die Emissionsintensität ist innerhalb des Nebels eben nicht konstant.

Extraktion des Spektrums

Nachdem auch der Himmelshintergrund möglichst gut eliminiert ist, lässt sich aus der korrigierten 2d-Summenaufnahme das 1d-Spektrum erzeugen (Extraktion). Das geschieht durch spaltenweise Integration der Pixelintensitäten im Bereich des Spektrumstreifens mittels spezieller Reduktionssoftware. Die Anzahl der Pixelzeilen, die zur Extraktion verwendet werden, sollte so bemessen sein, dass etwa 90-97 % der Intensität des Spektrumstreifens erfasst werden. Unnötig breit sollte der ausgewählte Pixelzeilenstreifen nicht sein, nur um die letzten Prozent Intensität zu erfassen, weil mit den äußeren, schwach belichteten Zeilen deren Rauschen im 1d-Spektrum eingefangen wird, ohne dass die Intensität im 1d-Spektrum noch signifikant anwächst. Zur Verdeutlichung ist in der Abbildung 3 ein Spaltenprofil einer dunkkorrigierten Summenaufnahme geplottet. Das Maximum des Spektrumstreifens liegt auf Pixelzeile Nr. 598. Der Streifen ist etwa 40 Pixel breit. Die Integration sollte etwa über die Pixelzeilen 586 bis 610 erfolgen. Der Signalverlust liegt < 10 % und ist da-

mit vertretbar. Kostenlos zur Verfügung stehende professionelle Software wie z. B. ESO-MIDAS besitzt komplexe Routinen, welche die Integration der Pixelspalten unter Wichtung des Pixelinhalts vornimmt und damit den sonst etwas willkürlichen Kompromiss zwischen S/N und berücksichtigter Signalstärke auf eine mathematische Grundlage stellt.

Das Ergebnis der spaltenweisen Integration ist das 1d-Spektrum, das den relativen Intensitätsverlauf über die Pixelspaltennummer zeigt (Abb. 4). Dieser Schritt wird Extraktion genannt.

Alle weiteren Schritte hängen vom Messziel ab. Zum einen kann das Spektrum wellenlängenkalibriert und/oder normiert werden. Des Weiteren kann das S/N (Signal-Rausch-Verhältnis) berechnet werden, oder es interessieren die Flächen von Absorptions- oder Emissionslinien (ihre „Äquivalentbreite“ EW).

Wellenlängenkalibrierung

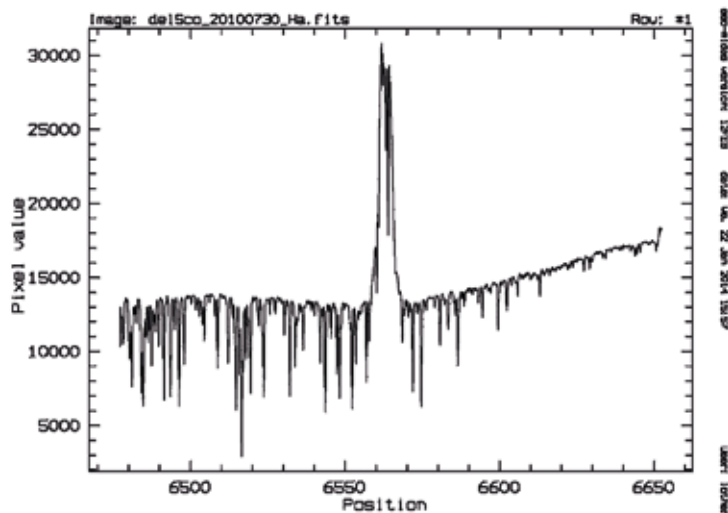
Die Kalibrierung nach der Wellenlänge kann auf verschiedene Arten erfolgen. Wenn keine unabhängige Kalibrierlicht-Spektromaufnahme zur Verfügung steht (bei spaltlosen Spektrografen ist die Aufnahme von unabhängigen Kalibrierspektren nicht möglich) lässt sich die Kalibrierung in guter Näherung mittels eindeutig identifizierbarer Linien im Objektspektrum durchführen. In der Regel wird man bei Verwendung eines Spaltspektrografen allerdings Kalibrierspektren aufnehmen,

wobei die Gitterstellung exakt gleich sein muss wie bei den Objektaufnahmen. Deshalb werden am zweckmäßigsten je eine Kalibrierlichtaufnahme vor und nach der Objekt-Messserie belichtet, so dass Wellenlängenverschiebungen beispielsweise durch thermisch-mechanische Verformungen (nächtlicher Temperaturgradient, Nachführbewegung des Teleskops) minimal sind und notfalls erkannt und korrigiert werden können.

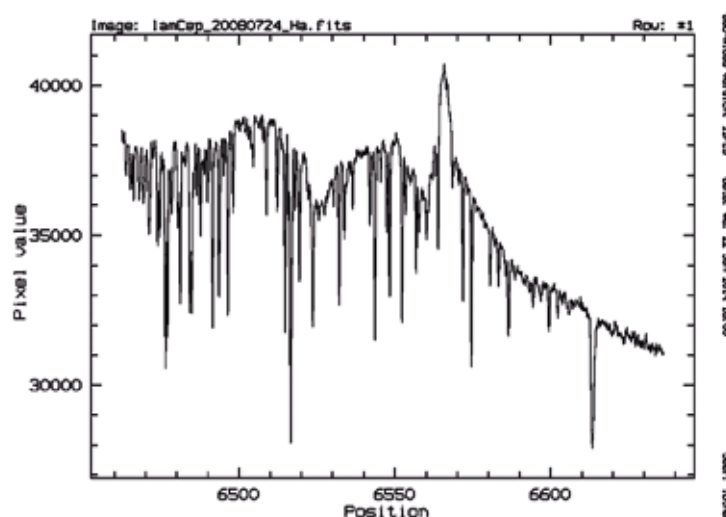
Die Wellenlängenkalibrierung erfolgt mit spezieller Datenreduktionssoftware für Spektren. Im Prinzip werden möglichst viele Emissionslinien der Kalibrierlichtquelle im 1d-Kalibrierspektrum (das gleich extrahiert wird wie das 1d-Objektspektrum) identifiziert und ihre Wellenlängen der Software bekannt gemacht. Diese fittet an die identifizierten Emissionslinien Gaußprofile zur Ermittlung des subpixelgenauen Intensitätsmaximums und gewinnt aus den Pixelkoordinaten (Maxima in Dispersionsrichtung) und den bekannten Wellenlängen eine Kalibrierfunktion in Form eines Polynoms wählbarer Ordnung, die dann auf das 1d-Objektspektrum übertragen wird. Damit ist die Pixelskala der Abszisse in eine Wellenlängenskala transformiert, die anschließend durch Rebinning linearisiert wird (vgl. 1d-Spektrum in Abb. 2).

Normierung

Nach der Extraktion des 1d-Rohspektrums aus der korrigierten 2d-Objektaufnahme zeigt die Ordinate eine relative



5 Nicht normiertes 1d-Summenspektrum von Delta Scorpii im Bereich der $H\alpha$ -Linie (6563 Angström), mit gut ausgeprägtem Kontinuumverlauf



6 Nicht normiertes 1d-Summenspektrum von Lambda Cephei im Bereich der $H\alpha$ -Linie (6563 Angström) mit unklarem Verlauf des Kontinuums

Intensitätsskala. Die Punkte der Spektrumkurve sind in y-Richtung einfach die Integrationsergebnisse der Extraktion, also die Summe der ADU der in den diskreten Pixelspalten beteiligten Pixel (ausgewählte Breite des Spektrumstreifens). Diese ist natürlich bei jedem 1d-Spektrum anders, weshalb solche Spektren schlecht direkt visuell vergleichbar sind, auch wenn sie vom gleichen Objekt stammen und den gleichen Wellenlängenbereich umfassen.

Die einfachste Abhilfe ist die Einpunktnormierung: Man nimmt immer an der gleichen Wellenlänge die jeweilige Intensität und teilt das 1d-Spektrum durch diesen Wert. Somit haben dann alle so behandelten Spektren bei dieser Wellenlänge die Intensität 1, die Kurven schneiden sich alle in diesem Punkt. Plottet man jetzt Spektren übereinander, sind Unterschiede (z. B. zeitliche Veränderungen) sofort erkennbar. Alle Spektren passen in den Plot.

Die Einpunktnormierung ist eine lineare Transformation, sie verändert nicht das Messergebnis, das Spektrum an sich. Schwieriger wird es bei der Normierung auf das Kontinuum eines Sterns. Es muss nämlich entschieden werden, welche Punkte des 1d-Spektrums zum Kontinuum des Sterns und welche bereits zu Emissions- oder Absorptionslinien gehören. Dies ist nicht immer zweifelsfrei zu begründen.

Bei WR-Sternen ist die Photosphäre nicht sichtbar, weil sie unter dem dichten Sternwind im optisch dichten „Nebel“ liegt. Also ist im 1d-Spektrum nirgends ein Kontinuum des Sternlichts vorhanden. Worauf soll man dann normieren? Die Emissionen eines Nebels sind diskret. Ein (thermisch erzeugtes) Kontinuum gibt es bei ihnen nicht. Auch Spektren von Emissionsnebeln können deshalb nicht auf ein Kontinuum normiert werden.

Kommen wir zu den „normalen“ Sternen zurück. Hier wird in der Photosphäre dem aus der Tiefe kommenden Kontinuum ein Muster von Absorptionen aufgebracht, das Resultat messen wir dann als 1d-Spektrum. Wenn der Stern nur relativ wenige aufgelöste Linien im Spektrum zeigt, ist die Festlegung des Kontinuums für die Normierung kein Problem. Handelt es sich um späte Sterne, dann ist das optische 1d-Spektrum so komplex und voller Linien, die sich teilweise überlappen („blends“), dass die Festlegung des Kontinuums zum Abenteuer wird. Hier ist schnell die Grenze von der exakten Messung zur „künstlerischen Interpretation“ überschritten. Beispiele sind in den Abbildungen 5 und 6 gezeigt.

In der Abbildung 5 ist trotz der vielen schmalbandigen Wasserabsorptionslinien und der $H\alpha$ -Linie in Emission klar das Kontinuum erkennbar. In der Abbildung 6 glaubt man auf den ersten Blick auch, das Kontinuum festlegen zu können. Bei

genauerem Hinsehen ist im Bereich der breiten Kombination aus Absorptionen und Emissionen zwischen 6500 und 6575 Angström unsicher, wo genau das Kontinuum verläuft. Hier wird das Normieren auf ein Pseudokontinuum ein abenteuerliches Unterfangen, das nicht mehr wissenschaftlichem Anspruch genügt.

Es gäbe noch Vieles zur Reduktion von optischen Spektromaufnahmen zu sagen. Aber das kann auch an anderer Stelle nachgelesen werden. Ich empfehle dafür die Internetseiten der Fachgruppe Spektroskopie [2], ihr Forum [3] und meine private Seite [1]. Bei der Auswertung von Spektren ist viel Erfahrung gefragt, aber deshalb bleibt sie auch immer spannend. Im Teil 4 des Beitrags werde ich auf die Interpretation von Sternspektren eingehen, insbesondere das Erkennen von Strukturen, die vom Stern stammen, und Artefakten und Störeffekten, welche nicht dem Sternlicht zugeordnet werden dürfen.

Weblinks:

- [1] L. Schanne, www.astro spectroscopy.eu/Einsteiger/Flats/flats.htm, Stand Januar 2014.
- [2] <http://spektroskopie.fg-vds.de/>
- [3] <http://spektroskopieforum.vdsastro.de/index.php>