

Jugend forscht 2012

Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Thema: Beobachtung und Untersuchung des Sternsystems 51 Pegasi mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode

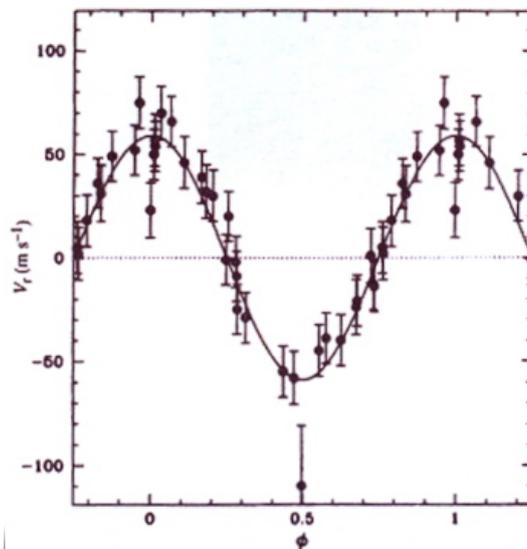


Abb.1: Radialgeschwindigkeitsperiodizität von 51 Pegasi [5, 28]

Eingereicht von Daniel Kuna

**Betreuungslehrer:
Heinz-Werner Oberholz
und André Liemann**

Unterstützt durch Ernst Pollmann und Shelyak Instruments

Datenblatt

Nachname: Kuna
Vorname: Daniel
PLZ: 48167
Ort: Münster
Straße: Zwi-Schulmann-Weg 30
Telefon privat: 0251 – 521987
eMail: daniel.kuna@t-online.de
Geb.-Datum: 07.09.1993
Geschlecht: männlich
Bundesland: Nordrhein-Westfalen
Schule: Gymnasium Wolbeck
Anschrift: Von-Holte-Straße 56
48167 Münster
Frühere Teilnahme: Ja (2011)
Klasse: 12. Klasse

Vorwort

Die Idee zu dieser Arbeit entstand in einer Vielzahl von Fachgesprächen während des letzten „Jugend forscht“ Wettbewerbs, bei dem ich mich mit photometrischen Nachweismethoden von Exoplaneten beschäftigte.

Der Versuch eines spektroskopischen Nachweises reizte mich sehr, obwohl ich in einem frühen Stadium der Beschäftigung mit dieser Materie feststellen musste, dass spektroskopische Nachweise von Exoplaneten bisher nur einer Minderheit von Amateurastronomen gelungen ist [18].

Bei diesem Vorhaben wurde ich von der Firma Shelyak Instruments (Frankreich), vertreten durch Oliver Thizy, durch das kostenlose leihweise Zurverfügungstellen des Spektrographen LHIREs III maßgeblich unterstützt. Ohne dieses Instrument wäre das Projekt nicht realisierbar gewesen.

Eine vertiefende fachliche Einführung, speziell in die Auswertevorgänge der Astrospektroskopie, und die Möglichkeit, die notwendigen Spektren aufzunehmen, erhielt ich durch Ernst Pollmann von der spektroskopischen Arbeitsgemeinschaft „ASPA - Aktive Spektroskopie in der Astronomie“ in Leverkusen, der mir auch im Verlauf der Arbeit ein kompetenter Ansprechpartner war.

Für diese mir entgegengebrachte Unterstützung möchte ich mich ganz besonders bedanken. Ebenso möchte ich mich bei meinen Betreuungslehrern (Heinz-Werner Oberholz und André Liemann) für die kritischen Hinterfragungen während der Erstellung der Arbeit herzlich bedanken.

Daniel Kuna

Inhaltsverzeichnis

Datenblatt	II
Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Beschreibung des Vorhabens	1
2.1 Entdeckung von Exoplaneten.....	1
2.2 Darstellung der Untersuchungsmethode	2
2.3 Kurzbeschreibung des Untersuchungsobjektes 51 Peg / 51 Peg b.....	4
3 Definition der Vorgehensweise	4
3.1 Spektrengewinnung.....	4
3.2 Spektrenvorverarbeitung.....	6
4 Wellenlängenkalibrierung	7
4.1 Tellurische Absorptionslinien	7
4.2 Verfahren der Wellenlängenkalibrierung.....	9
5 Ergebnisse.....	12
6 Fazit.....	17
Quellen- und Literaturverzeichnis.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Radialgeschwindigkeitsperiodizität von 51 Pegasi	I
Abb.2: direkter Nachweis des Exoplaneten 2M1207 b	2
Abb. 3: Dopplereffekt bei Licht am Beispiel von Sternbewegungen	2
Abb. 4: Doppler-Verschiebung durch Hin- und Herwackeln des Sterns	3
Abb. 5: Rot- und blauverschobene Spektren	4
Abb. 6: LHIRES III am Teleskop.....	5
Abb.7: Beispiel für die – subjektive - Ermittlung eines Pseudokontinuums.....	7
Abb. 8: Absorptionslinien im Fraunhofer Spektrum.....	8
Abb. 9: Kalibration des Spektrums von 51 Peg mit tellurischen Wasserdampflinien	8
Abb. 10: Exemplarisches Dispersionsdiagramm aus dem Spektrum vom 30.11.2011.....	10
Abb. 11: Abweichung der Datenpunkte von der im Dispersionspersionsdiagramm ermittelten linearen Ausgleichsgerade	10
Abb.12: Ungenauigkeit der Wellenlängenkalibration am Beispiel des Spektrums vom 15.11.2011	11
Abb. 13: Ein exemplarisches Spektrum des Sterns 51 Peg mit Eintrag der identifizierten tellurischen Wasserdampflinien	12
Abb.14: Spektrum vom 15.11.2011 zur RV-Bestimmung mit dem Programm SpecRave	12
Abb.15: Veranschaulichung des Gaussfittung; Gaußfunktion wird an Absorptionslinie angepasst.....	13
Abb.16: Auftragung der ermittelten RV gegen die FWHM-Werte.....	14
Abb. 17: Die mit SpecRave2.0 ermittelten, phasenbezogenen Radialgeschwindigkeiten	14
Abb.18: Hochladen, Eingabe der „Settings“ und Auswahl Spektralbereich.....	15
Abb.19: Erstellung der Funktion zur Kreuzkorrelation.....	16
Abb.20: Übersicht der Beobachtungsphasen nach M&Q u. B&M in Gegenüberstellung der SpecRave- und KK-Radialgeschwindigkeiten.	16
Abb.21: Endergebnis der Beobachtungen	17

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll das Sternsystem 51 Peg im Sternbild Pegasus näher untersucht werden, mit dem Ziel, die periodisch variable Radialgeschwindigkeit des Sternes über einen längeren Zeitraum hinweg zu ermitteln, um mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse Rückschlüsse auf seinen Begleiter 51 Peg b zu ziehen.

Mit Hilfe eines Spektrographen werden mehrere Spektren des Sternes 51 Peg zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen und ausgewertet.

Im ersten Teil der Arbeit erläutere ich zunächst die Radialgeschwindigkeitsmethode, mit deren Hilfe der Nachweis eines Exoplaneten möglich ist und begründe meine Entscheidung, diese Methode an meinem ausgewählten Exoplaneten anzuwenden. Sowohl die Spektrengewinnung als auch die Spektrenverarbeitung werden, einschließlich der Wellenlängenkalibration, eingehend erklärt und anhand einiger Beispiele verständlich gemacht.

Neben den eigentlichen Messungen und Auswertungen liegt der besondere Schwierigkeitsgrad der Arbeit darin, dass im Vergleich zu den hierfür normalerweise erforderlichen hochprofessionellen Messinstrumenten, wie sie an großen Observatorien oder auf verschiedenen Weltraumteleskopen (Corot, Kepler) zur Verfügung stehen, mir nur ein vergleichsweise einfacher Spektrograph (pro Aufnahme ein frei wählbarer Ausschnitt von 200 Angström aus dem Gesamtspektrum) zur Verfügung steht. Dieses bedeutet, dass die Radialgeschwindigkeit (RV = radial velocity) jeweils nur an einer einzigen Wasserstoffabsorptionslinie (H α -Linie) ermittelt werden kann.

Um zu untersuchen, ob man durch die Veränderung einzelner Parameter bei der Auswertung die Messgenauigkeit der Radialgeschwindigkeit erhöhen und damit das Ergebnis trotz eingeschränkter, technischer, Möglichkeiten optimieren kann, werden unterschiedliche Methoden bei der Auswertung angewandt.

Gleichfalls wurden die Genauigkeitsanforderungen an die jeweiligen Radialgeschwindigkeitsberechnungen, der mit meinen technischen Möglichkeiten erreichbaren Messgenauigkeit, gegenübergestellt.

Da mir für die Aufnahme der Spektren nur begrenzte technische Mittel zur Verfügung standen, soll das ermittelte Ergebnis abschließend bewertet und in einen übergeordneten Kontext gestellt werden (Vergleich mit international anerkannten Ergebnissen [5]).

Abschließend werden die ermittelten Ergebnisse bzgl. der oben erwähnten Radialgeschwindigkeitsperiodizität zusammengefasst, damit eventuell der abschließende Nachweis für die Existenz des Exoplaneten 51 Peg b geführt werden kann.

2 Beschreibung des Vorhabens

2.1 Entdeckung von Exoplaneten

Exoplaneten sind Planeten, die einen Stern außerhalb unseres Sonnensystems umkreisen. Schon in den 1980er Jahren wurden die ersten Exoplaneten (HD 114762 b, Gamma Cephei b) entdeckt. Jedoch konnten sie damals aufgrund von unzureichenden technischen Möglichkeiten weder sicher bestätigt noch von unabhängigen Forschern nachgewiesen werden. Gamma Cephei b wurde zunächst sogar als Brauner Zwerg klassifiziert. Erst später konnten beide eindeutig als extrasolare Planeten nachgewiesen werden [26].

Den internationalen Durchbruch schafften später zwei Wissenschaftler - Michel Mayor und Didier Queloz - vom Department für Astronomie der Universität Genf. Sie wiesen den Exoplaneten 51 Peg b mit

Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode nach und erbrachten so den ersten international anerkannten Nachweis für einen Exoplaneten. 51 Peg b war auch der erste Planet der den Typus „Hot Jupiter“ aufgrund seiner Masse (ähnlich der des Jupiters) und seiner Nähe zu seinem Mutterstern bekam [16, 17].

Heute kann man mit Hilfe der Photometriemethode (siehe letztjährige „Jugend forscht“-Arbeit), der Radialgeschwindigkeitsmethode und des Gravitationslinseneffektes Exoplaneten auch im Amateurbereich nachweisen. Zu den erfolgreichsten Methoden gehört die Photometrie- wie auch die Radialgeschwindigkeitsmethode.

Ein erster direkter Nachweis eines Exoplaneten gelang am 10. September 2004, als Wissenschaftlern der ESO eine direkte Abbildung eines Planeten beim 225 Lichtjahre entfernten Braunen Zwerg 2M1207 gelang (siehe Abb. 2) [27].

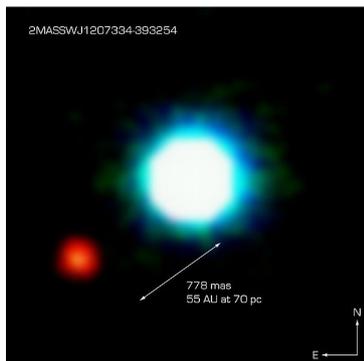


Abb.2: direkter Nachweis des Exoplaneten 2M1207 b [24]

Inzwischen (Stand: 11. Januar 2012) sind über 709 Exoplaneten offiziell bestätigt und anerkannt worden. Weitere 2326 vielversprechende Kandidaten müssen z.Zt. noch überprüft werden [25].

2.2 Darstellung der Untersuchungsmethode

Mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode ist es möglich, Planeten, die sich in einer Umlaufbahn um einen weit entfernten Stern befinden, zu entdecken und auch nachzuweisen.

Umkreist ein Exoplanet seinen Mutterstern, so bewegen sich beide um ihren gemeinsamen Schwerpunkt im Raum. Allgemein versteht man unter der Radialgeschwindigkeit die Geschwindigkeitskomponente eines Himmelskörpers (hier: 51 Peg) in Richtung der Sichtlinie des Beobachters (Erdbewohner). Diese Bewegung bzw. die Geschwindigkeit des Sterns kann nun mit Hilfe des Lichtes, welches vom Stern ausgesendet wird, registriert und gemessen werden. Durch seine Rotation um den gemeinsamen Schwerpunkt (Baryzentrum), bewegt sich der Stern periodisch auf uns zu und von uns weg. Nähert er sich uns, ist sein Spektrum ins Blaue verschoben; entfernt er sich von uns, ist das Spektrum des Sternes ins Rote verschoben (vgl. Abb. 3 und 4).

Dopplerverschiebung

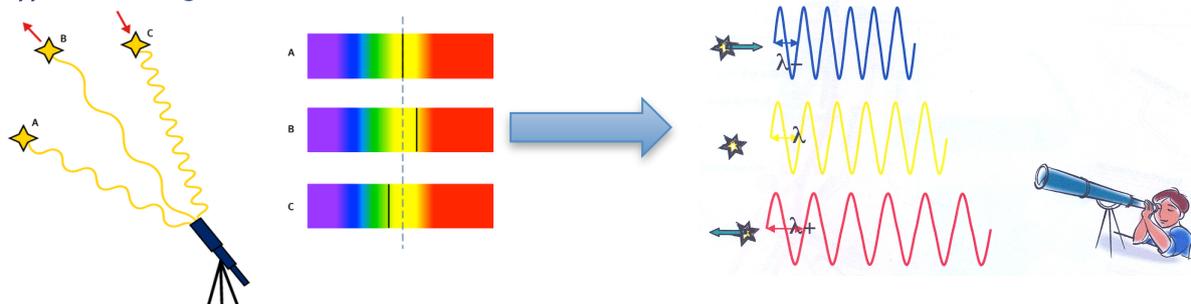


Abb. 3: Dopplereffekt bei Licht am Beispiel von Sternbewegungen [21]

Je nachdem, wie schnell der Stern sich nähert oder entfernt, ändert sich die Größe der Wellenlängenverschiebung. Diese kann man nun mit Hilfe des Dopplereffektes berechnen, da dieser Effekt auch bei Lichtwellen auftritt.

Aus den gewonnenen Ergebnissen (Spektren des Sternes) können nun weitere Erkenntnisse über den entdeckten Exoplaneten abgeleitet werden. Beispielsweise können die Orbitparameter des Begleiters (z.B. Entfernung des Exoplaneten vom Stern) ermittelt werden. Durch längere Beobachtungen sind auch Rückschlüsse auf die Umlaufdauer des Exoplaneten möglich (Radialgeschwindigkeitsperiodizität) [1, 31].

Letztlich birgt aber auch diese scheinbar effektivste Methode Nachteile. Beispielsweise können die Linien des Spektrums durch die Veränderung der Temperatur des Sternes verbreitert werden, was erhebliche Schwierigkeiten in der anschließenden Auswertung zur Folge hat. Ein weiterer bedeutender Nachteil sind die unterschiedlichen Bahnebenen, die ein Exoplanet, von der Erde aus gesehen, einnehmen kann. Ist seine Bahn z.B. um 90° Grad, relativ zur Sichtrichtung von der Erde aus, geneigt, kann keine - durch den Exoplaneten verursachte, regelmäßig sich verändernde - Dopplerverschiebung des Sternenspektrums gemessen werden. In einem solchen Fall ist der extrasolare Planet mit der Radialgeschwindigkeitsmethode nicht nachweisbar.

Natürlich kann es auch zum umgekehrten Fall kommen. Ist die Bahn des Exoplaneten um 0° Grad gegenüber der Sichtlinie zur Erde geneigt, ergibt sich eine maximale Dopplerverschiebung des Sternenspektrums. Solange aber die Orientierung der Bahnebene unbekannt ist, kann man nur die absolute Minimalmasse des Exoplaneten angeben. Dabei kann es sich bei diesem potenziellen Exoplaneten auch um kleine Sterne handeln (damaliger Irrtum bei HD 114762 b im Sternbild „Haar der Berenike“; wurde zunächst für einen Braunen Zwerg gehalten) [23].

Auch ist eine exakte Messung der Rot- bzw. Blauverschiebung häufig kaum möglich, da es keine feste Referenz für die aufgenommenen Spektren gibt. Folglich ist ein Vergleich mit einem „richtigen“ Spektrum des Sternes, das nicht dopplerverschoben ist, nicht möglich. Daher kann auch die ermittelte Radialgeschwindigkeit nie den tatsächlichen Wert wiedergeben [23, 31].

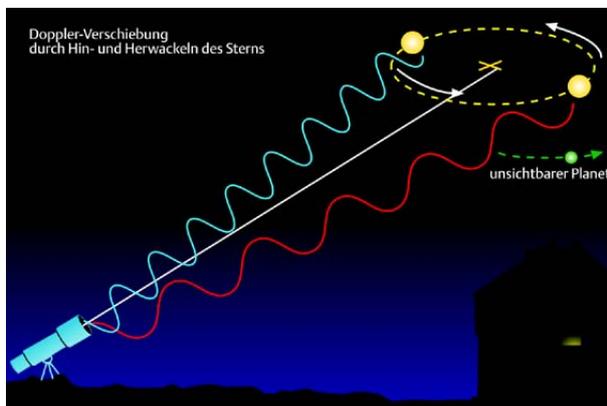


Abb. 4: Doppler-Verschiebung durch Hin- und Herbewegen des Sterns [22]

Abbildung 5 soll den Dopplereffekt bei Licht nochmals näher veranschaulichen. Das rot markierte Spektrum zeigt eine Entfernung des beobachteten Sternes vom Beobachter (Rotverschiebung), das blau markierte Spektrum steht für eine Näherung des Sternes (Blauverschiebung). Die türkisfarbene Linie soll den mittleren Verlauf beider Spektren wiedergeben und hat keine nähere Bedeutung.

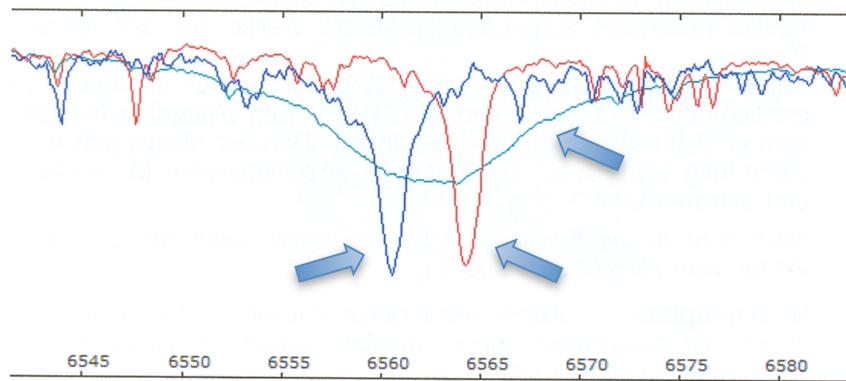


Abb. 5: Rot- und blauverschobene Spektren [15]

Meine Entscheidung, die Radialgeschwindigkeitsmethode anzuwenden, lässt sich aus den Gegebenheiten im Sternsystem 51 Peg begründen. Bisher konnte die Veränderlichkeit bzw. Abdeckung des Sternes („Minifinsternis“) nie photometrisch nachgewiesen werden (photometrische Variabilität liegt bei 0,002 mag; mag = Magnituden) [5]. Daher schied die Photometriemethode für mein Vorhaben aus, und ich beschloss die Radialgeschwindigkeitsmethode, die unter Amateuren weit verbreitet ist, anzuwenden.

2.3 Kurzbeschreibung des Untersuchungsobjektes 51 Peg / 51 Peg b

Der von mir mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode untersuchte Exoplanet 51 Peg b befindet sich im Sternbild Pegasus und umkreist dort den 50,1 Lichtjahre entfernten gelben Zwerg 51 Pegasi (51 Peg), der ca. 8 Milliarden Jahre alt ist und zum Spektraltyp G2IV gehört [7, 16, 17].

Um seinen Stern, der in klaren Nächten auch von der Erde aus mit bloßem Auge im Sternbild Pegasus zu erkennen ist (Helligkeit 5,49 mag), einmal vollständig zu umkreisen, benötigt er 4,23077 Tage. Folglich ist seine Entfernung zu 51 Peg mit nur 0,052 AU (Astronomical Unit = mittlerer Abstand Erde – Sonne = 149,6 Millionen Kilometer) äußerst gering und seine Oberflächentemperatur mit 1.255 K (982°C) dementsprechend hoch [7, 16, 17].

51 Peg b wurde 1995, als erster Exoplanet überhaupt vom Schweizer Professor Michel Mayor und seinem Mitarbeiter Didier Queloz vom Department für Astronomie der Universität Genf mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt. Bekannt gegeben wurde seine Existenz am 5. Oktober 1995 auf dem „9th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun“ in Florenz. Kurz darauf konnte seine Existenz auch von weiteren Wissenschaftlern, u.a. von Dr. Geoffrey Marcy von der San Francisco State University und Dr. Paul Butler von der University of California, Berkeley, bestätigt werden.

Er war auch der erste Exoplanet der als „Hot Jupiter“ klassifiziert wurde, da er in etwa die Hälfte der Masse des Jupiters besitzt ($0,468 \pm 0.007 M_J$) und zudem sehr heiß ist [16, 17].

3 Definition der Vorgehensweise

3.1 Spektrengewinnung

Für die Spektrengewinnung ist nicht nur die technische Ausrüstung sondern auch ein Aufnahmeort mit einer möglichst geringen Lichtverschmutzung (Straßenbeleuchtung, Wohnungsbeleuchtungen etc.) wichtig. Damit ich mein Untersuchungsobjekt überhaupt beobachten kann, ist ein lichtstarkes Teleskop notwendig, da der Stern 51 Peg nur eine Helligkeit von 5,49 mag besitzt. Durch die spektrale Zerlegung des Lichtes wird zudem das ankommende Licht nochmals stark geschwächt. Außerdem erschweren die äußerst kurze Periode des Exoplaneten (4,23 Tage) und die sehr geringe Amplitude der Radialgeschwindigkeitsvariabilität von ca. 50 m/s die entsprechenden Messungen.

Die zur Verfügung stehenden Beobachtungsinstrumente (Teleskop, Spektrograph, Kamera) stellen u. a. die Rahmenbedingungen für die erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Beobachtungsvorhabens dar. Nach längeren Recherchen kam ich mit der französischen Firma Shelyak Instruments in Kontakt, die in der Entwicklung und Produktion von Amateurspektrographen international führend ist. Dem dortigen Salesmanager Oliver Thizy berichtete ich ausführlich von meinem Vorhaben, wonach er sich sehr schnell bereit erklärte, mir einen hochauflösenden Spektrographen vom Typ LHIRES III (Littrow**H**igh **R**esolution Spektrograph III) leihweise zur Verfügung zu stellen. Dieser Spektrographentyp ist für ein Öffnungsverhältnis des Aufnahmeteleskops von f/10 optimiert bzw. konstruiert.

Der LHIRES III ist mit einem Gitter von 1800 Linien/mm ausgestattet und besitzt damit bei der H α -Absorptionslinie eine spektrale Auflösung $R = \lambda/\Delta\lambda$ von 13.000. Mit diesem Auflösungsvermögen können Spektrendetails in der Größenordnung von 0.4 Å erkannt werden.

Für die Beobachtungen stand ein Schmidt-Cassegrain-C14-Teleskop mit einer Öffnung von etwas weniger als 40 cm und einem Öffnungsverhältnis von f/10 zur Verfügung.

Als CCD-Kamera verwendete ich das automatisch gekühlte Modell NOVA von der Firma Fischer Elektronik, das mit einem CCD-Chip des Typs KAF 402 ME ausgestattet ist. Der Chip hat eine Größe von 768x512 Pixel bei einer Pixelgröße von $9\mu\text{m}^2$.

Für die pixelgenaue Nachführung des Teleskopes und des Spektrographen auf das Untersuchungsobjekt 51 Peg verwendete ich eine handelsübliche Webkamera von Phillips, die über das Softwareprogramm „Guidemaster“ gesteuert wird. Meine Spektralaufnahmen konnten in der Sternwarte der „Vereinigung der Sternfreunde Köln e.V.“ unter Aufsicht und Anleitung von Ernst Pollmann durchgeführt werden.



Abb. 6: LHIRES III am Teleskop

Zur Aufnahme der Spektren wird der Spektrograph fest an das Teleskop angeschlossen (Abb. 6). Ein zur Wellenlängenkalibration erforderliches Referenzlicht in Form einer Neonglimmlampe ist vorn im Tubus der Eingangsöffnung des Teleskops nahezu in der Mitte der Spiegelmontierung fest installiert. Auf diese Weise kann ein Neon-Referenzspektrum vor und nach jeder einzelnen Spektrenserie reproduzierbar aufgenommen werden - ein für die Genauigkeit der späteren Wellenlängenkalibration außerordentlich wichtiger Arbeitsvorgang.

Im Anschluss daran richtet man das Teleskop auf das Zielobjekt (51 Peg) aus und bereitet die computer-gesteuerte Nachführung mit Hilfe des Programmes „Guidemaster“ während der Aufnahmen vor. Auch die bereits erwähnte CCD-Kamera muss angeschlossen sein. Für alle Aufnahmen wird zudem der achtfache Binning-Modus in Rektaszension (Stundenbewegung) aktiviert, um die Helligkeitswerte, die von der CCD-Kamera erfasst werden, zu erhöhen, da das Licht des Sternes durch die spektrale Zerlegung geschwächt wird. Bedingt durch dieses achtfach-Binning wird auf dem CCD-Chip ein Gesamtbild der Größe 768 Pixel (vertikal) x 64 Pixel (horizontal) produziert.

Nach dem Eintritt der Dunkelheit konnte somit mit den Aufnahmen begonnen werden. Die Belichtungszeit eines Einzelspektrums lag dabei in der Größenordnung von ca. 300-600 sec., wobei in der Regel etwa 5-10 Spektren (abhängig von der oftmals unsicheren Wetterlage) zu einer Spektrenserie zusammengefasst wurden. Das Achtfach-Binning und die Bildung eines Summenspektrums aus einer gegebenen Spektrenserie tragen entscheidend zur Verbesserung des Signal-zu-Rauschverhältnisses im Spektrum bei.

3.2 Spektrenvorverarbeitung

Um das durch die Beobachtung gewonnene Spektrum des Sternes 51 Peg weiterverarbeiten zu können, müssen zunächst einige Probleme beseitigt werden.

Im ersten Schritt muss das Rauschen, das in jeder einzelnen Aufnahme enthalten ist, möglichst stark verringert werden, um die Qualität des aufgenommenen Spektrums zu erhöhen. Durch verschiedene (z.T. äußere) Faktoren wird das Rauschen im aufgenommenen Spektrum verursacht.

Hier wäre z.B. das elektronische Ausleserauschen der CCD-Kamera (Bias-Korrektur), das thermische Rauschen der Kamera (Dark-Korrektur), der Empfindlichkeitsverlauf der Pixel auf dem CCD-Chip, der durch Staub oder Kratzer auf den optischen Komponenten beeinträchtigt worden ist (Flatfield-Korrektur) oder einfach die allgemeine Lichtverschmutzung durch Straßen- oder Stadtbeleuchtungen (Himmelshintergrundkorrektur) zu nennen. Die meisten dieser Störfaktoren werden von der Kamera selbst behoben oder können später manuell über das Programm VisualSpec beseitigt werden, sodass man sich auf die Minimierung des Rauschens konzentrieren kann [4].

Um das Rauschen, das größtenteils durch den CCD-Chip bedingt ist, zu reduzieren, muss man ausreichend viele Spektren des Zielobjektes (51 Peg) an einem Beobachtungsabend aufnehmen (Spektrenserie) und diese mit Hilfe des Programmes Giotto überlagern. Durch die Addition dieser einzelnen Spektren wird ein Summenspektrum (arithmetisches Mittel aus allen Spektren) hergestellt, in dem das Rauschen deutlich geringer ausfällt als in den einzelnen Aufnahmen. Sind genügend Spektren aufgenommen worden (Anzahl n), verringert sich das Rauschens kontinuierlich, was zur Verbesserung des Endergebnisses beiträgt:

Das Rauschen verhält sich umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Anzahl der aufgenommenen Spektren:

$$\frac{1}{\sqrt{n}}$$

Gleichzeitig sorgt das Programm Giotto mit einer zweifachen Superresolution dafür, dass das Spektrum im Subpixelbereich untersucht werden kann (Untersuchung nach spektralen Strukturen). Dafür wird das Summenspektrum um den Faktor 2 in beiden Richtungen vergrößert, um später die bereits erwähnten Untersuchungen zu ermöglichen.

Als nächstes muss das Summenspektrum von dem Programm VisualSpec gescannt und in ein anderes Dateiformat konvertiert werden, um eine weitere Bearbeitung zu ermöglichen. Nachdem das Spektrum gescannt worden ist, kann mit der Normierung fortgefahren werden.

Hierfür wird als nächstes das Kontinuum erstellt und das gescannte Summenspektrum normiert, da nur so eine wissenschaftlich verwertbare Analyse der Absorptionslinien (Bestimmung der Radialgeschwindigkeit) im Spektrum möglich ist. Unter einem Pseudokontinuum versteht man den Kurvenlauf, der wegen der Durchlässigkeitscharakteristik des gesamten verwendeten Instrumentariums und der irdischen Atmosphäre das wahre Sternkontinuum nicht naturgetreu entsprechend dem Planck'schen Strahlungsgesetz wiedergibt [13].

Dieser Kurvenverlauf wird nun – aus subjektiver Sicht – markiert und als Pseudokontinuum für die weitere Auswertung verwendet (siehe hierzu auch Abb.Nr.7) [4, 29, 32].

Das normierte Spektrum (höchster Intensitätswert gleich 1) erhält man anschließend, indem man das aufgenommene Spektrum durch das subjektiv erstellte Pseudokontinuum dividiert:

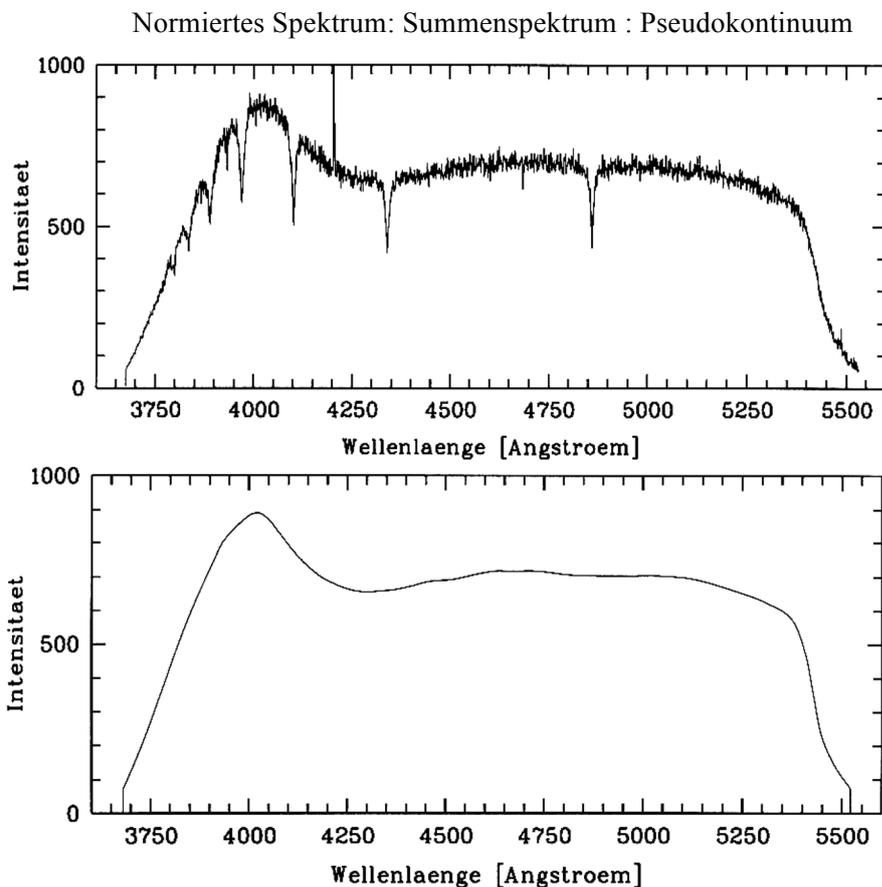


Abb.7: Beispiel für die – subjektive - Ermittlung eines Pseudokontinuums (obere Abbildung: gescanntes Summenspektrum; untere: Pseudokontinuum) [32]

Nachdem das Spektrum normiert und äußere Beeinträchtigungsfaktoren minimiert worden sind, kann mit der Kalibration des Spektrums fortgefahren werden.

4 Wellenlängenkalibrierung

4.1 Tellurische Absorptionslinien

Für die Kalibration meiner aufgenommenen Spektren waren die tellurischen Wasserdampflinien von entscheidender Bedeutung. Ohne sie wäre eine genaue Kalibration des Spektrums nicht erreichbar. Doch was sind überhaupt „tellurische Wasserdampflinien“?

Nicht alle Absorptionslinien, die im Spektrum zu erkennen sind, entstehen auch in der Photosphäre des beobachteten Sternes 51 Peg. Sobald das Licht des Sternes auf unsere Atmosphäre trifft, werden abermals Photonen aus dem Spektrum des Sternes 51 Peg durch die in unserer Atmosphäre vorhandenen Gasmoleküle absorbiert (z.B. durch Wasserdampfmoleküle). Das Besondere bzw. Einmalige an diesen tellurischen Linien ist die Tatsache, dass sie stets konstant und niemals dopplerverschoben sind [14]. Folglich eignen sich diese Linien als (nicht verschobene) Referenzlinien bei Radialgeschwindigkeitsmessungen. Mit Hilfe dieser festen Wellenlänge (Laborwerte) kann das Programm Visual Spec nun das gesamte Spektrum auf der x-Achse skalieren und die Wellenlängen der stellaren Absorptionslinien berechnen.

Tellurische (von lat. tellur = Erde; von der Erde stammend) Wasserdampflinien können jedoch auch unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Je höher die Luftfeuchtigkeit ist, desto stärker fällt die tellurische Wasserdampfabsorptionslinie im aufgenommenen Spektrum aus. Bei meiner Messung am 29.11.2011 war es relativ trocken, was letztlich auch die Auswertung der Spektren ungemein erschwerte, da die tellurischen Wasserdampflinien nur sehr schwach ausgeprägt waren.

Sogar drei der auffälligsten Fraunhoferlinien (A, a und B) sind auf irdischen Sauerstoff bzw. Wasserdampf zurückzuführen und daher tellurisch (vgl. Abb. 8).

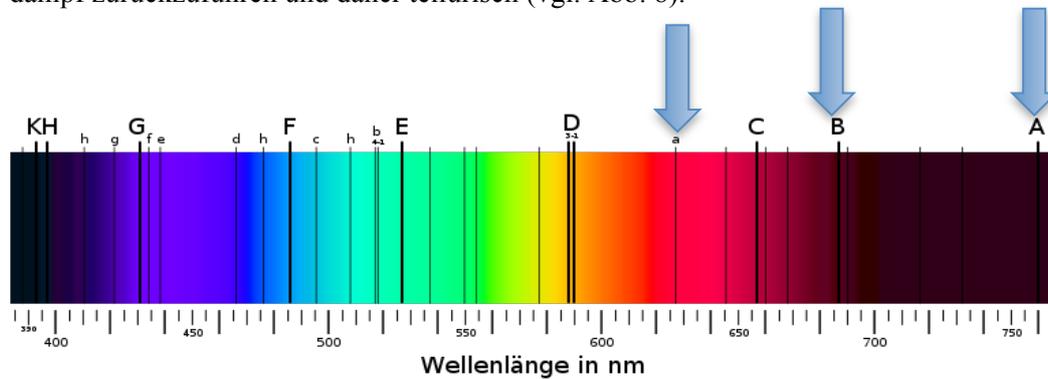


Abb. 8: Absorptionslinien im Fraunhofer Spektrum [3]

Die folgende Abbildung soll den Prozess der Kalibration noch einmal veranschaulichen. Das blau markierte Spektrum ist das aufgenommene Spektrum des Sternes 51 Peg. Dieses wird nun mit dem grünelblich markierten Spektrum der tellurischen Wasserdampflinien [2] abgeglichen. So können bereits erste Absorptionslinien in meinem aufgenommenen Spektrum als tellurische Wasserdampflinien identifiziert werden. Je mehr Wasserdampflinien im Spektrum von 51 Peg zur Verfügung stehen, desto genauer wird die anschließende Kalibration des Spektrums.

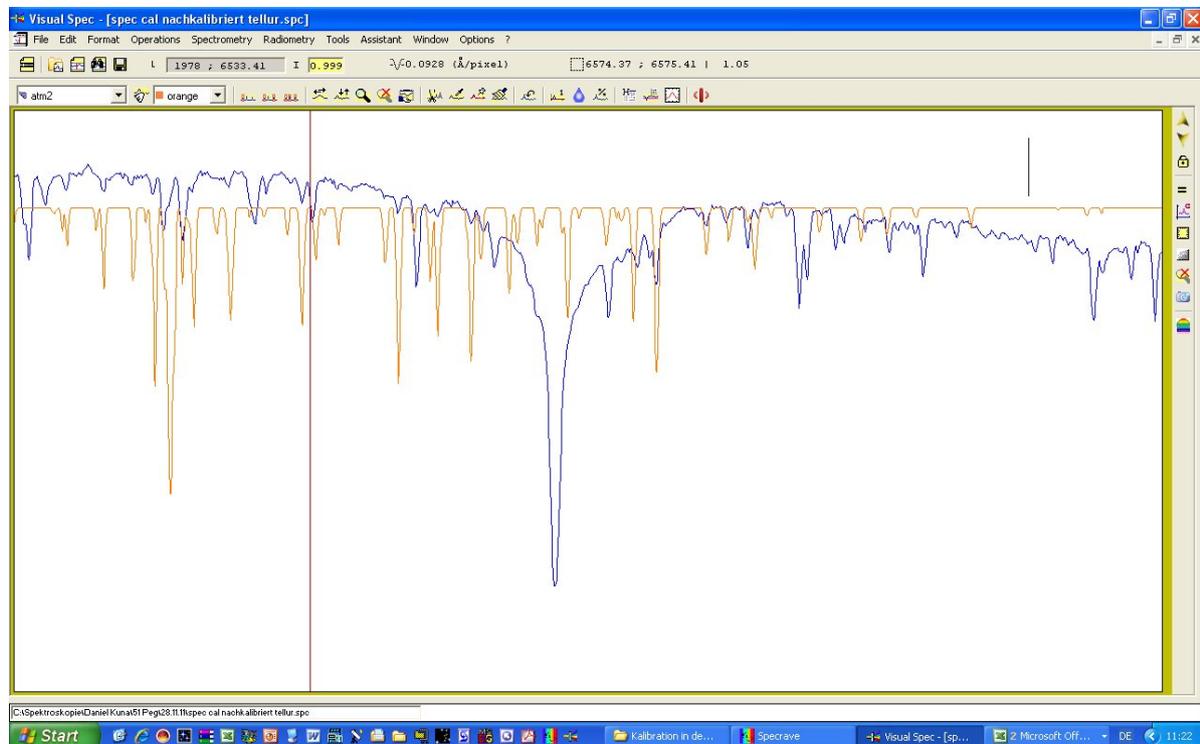


Abb. 9: Kalibration des Spektrums von 51 Peg mit tellurischen Wasserdampflinien

4.2 Verfahren der Wellenlängenkalibrierung

Ziel der Wellenlängenkalibrierung ist, jeder fortlaufenden Pixelnummer auf der x-Achse im Spektrum, eine bestimmte Wellenlänge (Laborwert) zuzuordnen, da die korrekten Wellenlängen der einzelnen Absorptionslinien zunächst noch unbekannt sind.

Für die Erstkalibration des bereits normierten Spektrums verwendet man das während der Beobachtung separat aufgenommene Neon-Spektrum, der sich im Teleskop befindlichen Neon-Glimmlampe (Neon-Emissionslinien sind bekannt). Nach Identifizierung der Absorptionslinien des Neonreferenzspektrums kann eine erste „grobe“ Kalibrierung des Sternenspektrums von 51 Peg erfolgen. Zu beachten ist hierbei, dass es gegebenenfalls Nullpunktverschiebungen (offsets) in der Wellenlängenskala geben kann, ausgelöst dadurch, dass die Neonlampe nicht genau zentral auf der optischen Achse des Teleskopes in den Strahlengang zugeschaltet wurde.

Um die Kalibrierungsgenauigkeit weiter zu erhöhen, verwendet man zusätzlich die tellurischen Wasserdampflinien (in der Abb. Nr.11 hellbraun markiert), die stets konstant und nicht dopplerverschoben sind. Sie sind in jedem aufgenommenen Spektrum (in der Abb. Nr. 11 blau markiert) vertreten, das von einem erdgebundenen Beobachter aufgenommen worden ist, und für eine genaue Kalibrierung unerlässlich. Hierfür sucht man im Spektrum nach einer - vermutlichen – tellurischen Wasserdampflinie und gleicht deren aktuellen Wellenlängenwert mit einer Tabelle, in der sämtliche Wellenlängenwerte aller bekannten tellurischen Wasserdampflinien verzeichnet sind, ab und stellt schnell fest, ob der gegenwärtige Wellenlängenwert passt und es sich bei der Absorptionslinie um eine potenzielle tellurische Wasserdampflinie handelt [2].

Auch wenn die Wellenlängenwerte schon nach der ersten Kalibrierung mit dem Neonspektrum sehr gut passen und damit die erreichte Kalibrierungsgenauigkeit schon ziemlich hoch ist, sollte man mit der zweiten Kalibrierung, der dann auch deutlich mehr Referenzlinien zu Grunde liegen (im Gegensatz zu nur drei Linien beim Neonspektrum), die Genauigkeit weiter erhöhen. Für diese Feinkalibrierung überlagert man nun das Aufnahmespektrum mit dem der tellurischen Wasserdampfabsorptionslinien (ist im Programm VisualSpec hinterlegt) und lässt das Programm VisualSpec nach vorhandenen Wasserdampflinien im zu untersuchenden Spektrum suchen (vgl. Abb. 9) [2, 8].

Für eine möglichst präzise Kalibrierung ist es ebenfalls wichtig, das Spektrum nach spektralen Strukturen im Subpixelbereich zu untersuchen, um so das exakte Minimum von jeder tellurischen Wasserdampflinie berechnen zu können. Dies geschieht mittels der zweifachen Superresolution (im Programm Giotto, mit dem die individuellen Einzelspektren einer gegebenen Serie zu einem Summenspektrum zusammengefasst werden). Sie hat man bereits in der Spektrenvorverarbeitung durchgeführt, denn sie ist ganz entscheidend für eine möglichst exakte Kalibrierung. Je genauer die Kalibrierung ausfällt, desto genauer kann man später auch die Radialgeschwindigkeit an der $H\alpha$ -Absorptionslinie messen.

Das folgende exemplarische Dispersionsdiagramm (Abb. 10) zeigt die Genauigkeit, mit der die entsprechenden Wellenlängen der tellurischen Wasserdampflinien den einzelnen Pixeln im normierten Spektrum zugeordnet werden konnten. Die Ausgleichskurve führt hier zu einem Korrelationskoeffizienten von 1,00 für die angegebenen Datenpunkte. Je hochgradiger das verwendete Polynom (hier: 4 Grades) ist, desto genauer fällt die Kalibrierung und damit auch die spätere Messgenauigkeit der Radialgeschwindigkeit aus. Um ein möglichst hochgradiges Polynom zu erhalten, sind möglichst viele Messpunkte notwendig, da für ein Polynom n -ten Grades $n-1$ Messpunkte benötigt werden [12].

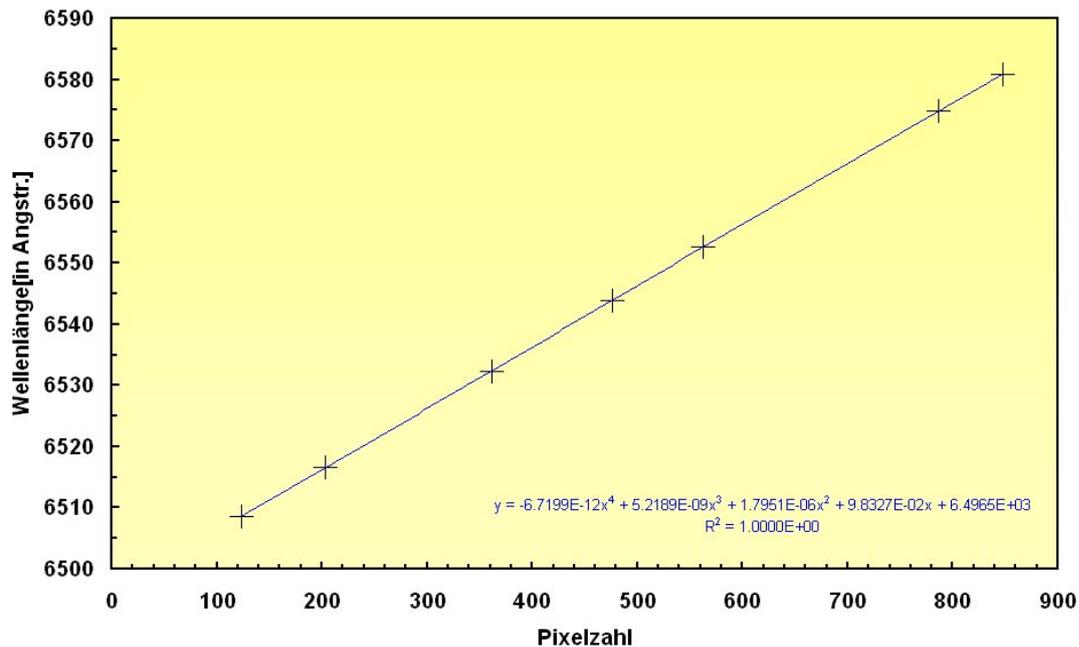


Abb. 10: Exemplarisches Dispersionsdiagramm aus dem Spektrum vom 30.11.2011

Folglich ist die sichere Identifikation vieler tellurischer Wasserdampflinien ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung. Aber auch die Kalibrierungspunkte sind stets mit einem Messfehler behaftet, sie können bei einer noch so genauen Kalibrierung nie ganz verhindert werden.

Das Dispersionsdiagramm zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Pixelposition im Spektrum. Für einen – wie den von mir verwendeten - Gitterspektrographen ergibt sich stets in erster Näherung (Ausgleichsgerade) eine Gerade, die scheinbar exakt auf allen Datenpunkten liegt und eine optimale Genauigkeit der von mir durchgeführten Wellenlängenkalibration suggeriert.

Wenn man nun Ausschnitte aus dem Dispersionsdiagramm vergrößern würde, würde man aber feststellen, dass die Datenpunkte (wie in der unteren Abb. 11 gezeigt) nie ganz auf der Ausgleichskurve liegen. Die Abweichungen von der Linearität sind in dieser Darstellung zwar übertrieben dargestellt, trotzdem liegt die tatsächliche Abweichung immer noch in einer Größenordnung von einem Promill (1/1000) [11].

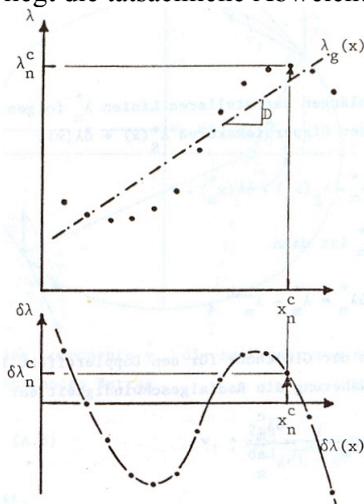


Abb. 11: Abweichung der Datenpunkte von der im Dispersionsdiagramm ermittelten linearen Ausgleichsgerade [11].

Die Genauigkeit der Wellenlängenkalibration ist explizit für jedes einzelne Summenspektrum berechnet worden. Da die hier zu ermittelnde Radialgeschwindigkeit von mehreren fehlerbehafteten Messgrößen abhängig ist, muss als resultierender Fehler die quadratische Addition aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz angegeben werden. Die Wurzel aus der Summe der quadratischen Abweichungen von $\Delta\lambda$ aus allen Beobachtungen hat hier den Wert von $1,635 \times 10^{-3} \text{ \AA}$, was einer Messunsicherheit in der Radialgeschwindigkeitsbestimmung von (\pm) 75 m/s bei der Wellenlänge H α (6563 \AA) entspricht. Dieser Messfehler ist somit als Fehlerbalken in den RV-Phasendiagrammen übernommen worden.

Diese Messgenauigkeit ist unter Berücksichtigung der hier verwendeten technischen Ausrüstung nicht weiter zu optimieren und bildet somit die Grundlage für die spätere Bestimmung der Radialgeschwindigkeit (siehe hierzu auch Abb. Nr. 12). Eine weitere Restungenauigkeit bei der Kalibrierung führt zu dem sog. offset der ermittelten Radialgeschwindigkeit, das z.T. aus dem Gaußfitting der tellurischen Wasserdampflinien resultiert, die nie ganz optimal verläuft.

lambda	raie	pixel	d_lambda
6508.59	1	109.319	0.0083
6516.57	2	196.1824	-0.0186
6532.359	3	365.1554	0.0181
6543.907	4	488.3919	-0.0054
6552.629	5	581.1511	-0.0034
6574.847	6	818.8276	0.001

$\Delta\lambda$ bei H α (6563 \AA) = 0.00311 \AA

Interpolation

Lambda = $\times 4$ 0 $+ x$ 9.0305E-2 $+ x^2$ -4.7045E-9 $+ x^3$ 6498.629 $+ x^4$ 7.2414E-6

Wellenlängenkalibrationsprotokoll:
Spektrum v. 2011-11-15

Abb.12: Ungenauigkeit der Wellenlängenkalibration am Beispiel des Spektrums vom 15.11.2011

Damit ergeben sich in der Summe Kalibrationsmessfehler bestehend aus :

- * der Qualität und Anzahl der aufgenommenen Spektren
- * der Anzahl der zur Verfügung stehenden Referenzlinien
- * der Pixelgröße des CCD-Chips der Aufnahmekamera
- * dem Gaußfitting der tellurischen Wasserdampflinien

Sind alle beschriebenen Arbeitsschritte (Scan, Normierung, Wellenlängenkalibrierung) erfolgreich durchgeführt worden, erhält man das in Abb. Nr. 15 dargestellte Spektrum.

Auf der y-Achse ist die Intensität und auf der x-Achse der entsprechende Wellenlängenbereich (in Angström) aufgetragen. Ebenso habe ich hier die jeweiligen verwendeten Wellenlängen der tellurischen Wasserdampfabsorptionslinien sowie die Wellenlänge der H α -Absorptionslinie eingetragen.

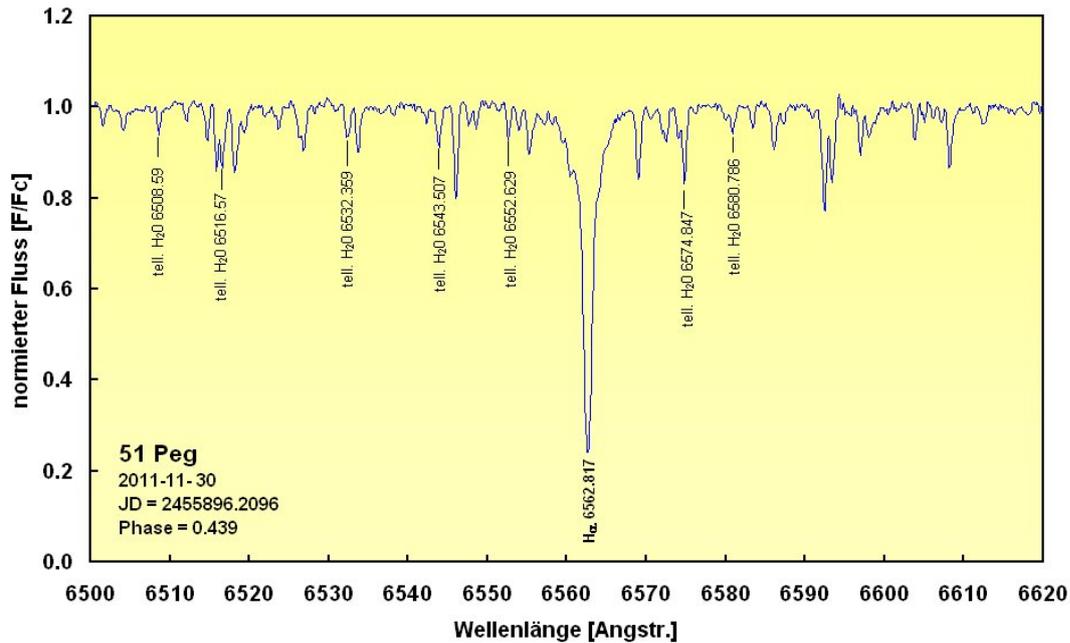


Abb. 13: Ein exemplarisches Spektrum des Sterns 51 Peg mit Eintrag der identifizierten tellurischen Wasserdampflinien

Für den abschließenden Schritt zur Bestimmung der gesuchten Radialgeschwindigkeit des Sterns 51 Peg, gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten:

- ★ Berechnung der Radialgeschwindigkeit anhand der am stärksten ausgeprägten Absorptionslinie – der H α -Absorptionslinie – mit Hilfe des Programmes SpecRave2.0
- ★ Berechnung der Radialgeschwindigkeit mit Hilfe der Kreuzkorrelation (KK)

5 Ergebnisse

Um nun die Radialgeschwindigkeit zu bestimmen, kann man auf die beiden bereits erwähnten Methoden zurückgreifen. Folglich begann ich mit der klassischen Auswertung des normierten und wellenlängenskalierten Spektrums. Hierfür habe ich das Softwareprogramm SpecRave2.0 (Entwickler: Roland Bücke und Helmut Jahns) verwendet und zunächst ein fertig vorverarbeitetes Spektrum hochgeladen [10].

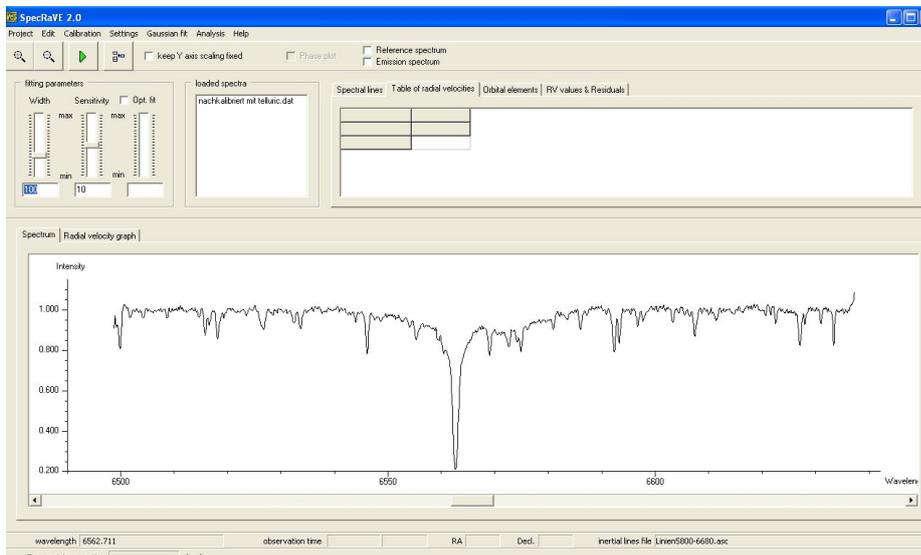


Abb. 14: Spektrum vom 15.11.2011 zur RV-Bestimmung mit dem Programm SpecRave2.0

Unter der Option „Settings“ werden die Koordinaten (DE, RA) des Objektes 51 Peg, Datum, die Aufnahmezeit (UTC-Time) der Beobachtung sowie die Koordinaten des Beobachtungsstandortes (51° Grad nördlicher Länge, 7° 10' östlicher Breite) eingegeben.

Diese Angaben sind für die Bestimmung des Geschwindigkeitsanteils, den alle stellaren Absorptionslinien enthalten und der durch die Bewegung des Beobachters (Erdbewohner; Korrekturen für Bahn- und Rotationsbewegung der Erde) verursacht wird, wichtig. Diese Korrekturen werden auch als heliozentrische Korrektur bezeichnet. Sie wird durch die Eingabe von Beobachtungszeit, Koordinaten des Beobachtungsstandortes und des Objektes automatisch von SpecRave2.0 berechnet [9, 11].

Im nächsten Schritt öffnet man eine Datei, in der die Wellenlängen der tellurischen Wasserdampflinien hinterlegt sind. Sodann inspiziert SpecRave2.0 im hochgeladenen Spektrum vorhandene tellurische Linien mit anschließender Blaumarkierung. Die H α -Absorptionslinie wird mit dem Button „Identify with H α “ markiert und zunächst mit einer Ausgangshalbwertsbreite (FWHM = fullwidth half maximum) festgelegt. Mit der Gaußfittung wird nun für die gewählte Halbwertsbreite im Linienminimum die Wellenlänge λ berechnet und die sich daraus ergebene Abweichung von den Laborwerten (Rot- bzw. Blauverschiebung) ermittelt, wonach anschließend die Radialgeschwindigkeit ausgegeben wird.

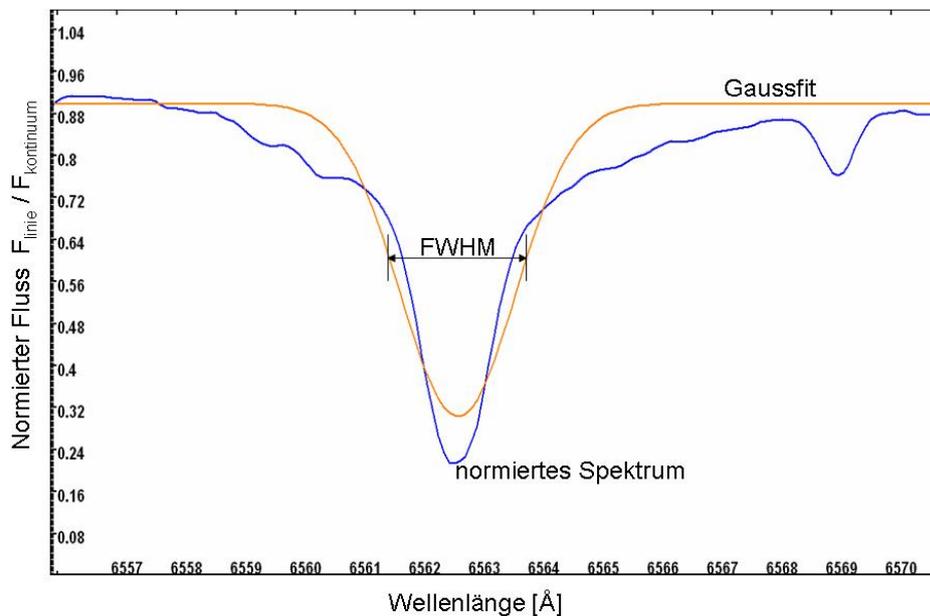


Abb. 15: Veranschaulichung des Gaußfittung; Gaußfunktion wird an Absorptionslinie angepasst

Um einen möglichst zuverlässigen Wert zu erhalten, rechnet man nun mit unterschiedlichen Halbwertsbreiten weiter und trägt die verwendeten FWHM-Werte gegen die ermittelte Radialgeschwindigkeit in einem Excel-Diagramm auf, wobei alle Werte innerhalb eines stabilen Bereiches zu einem Mittelwert zusammengefasst werden. Dieser Mittelwert repräsentiert somit den zuverlässigsten Wert der RV-Geschwindigkeit für den entsprechenden Beobachtungszeitpunkt, der in diesem Fall $-33,285$ km/s betrug.

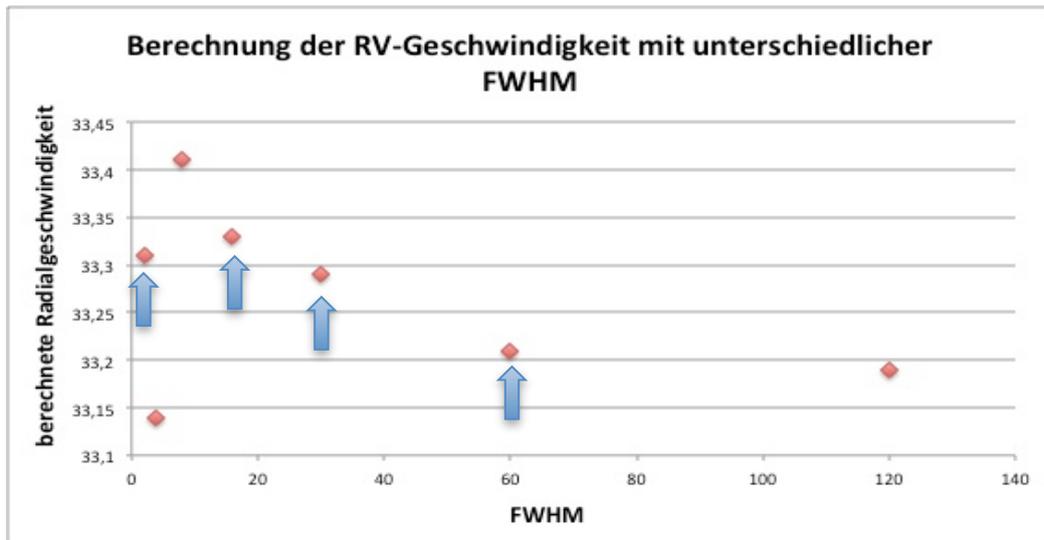


Abb.16: Auftragung der ermittelten RV gegen die FWHM-Werte (Spektrum vom 15.11.2011)

Mit diesem Prozess sind alle Spektren der Beobachtungen vom 15.11., 21.11., 28.11., 29.11. und 30.11.2011 ausgewertet worden, wobei eine Halbwertsbreite von 100 Pixeln zu den plausibelsten RV-Werten führte. Da die Periode des Exoplaneten exakt 4,230785 Tage beträgt, musste die Phase, der die ermittelte Radialgeschwindigkeit zugeordnet wird, mit Hilfe der Ausgangsepoche T_0 bestimmt werden. Im nachfolgenden Phasendiagramm sind die so erhaltenen Radialgeschwindigkeitswerte unter Verwendung der Ausgangsepochen T_0 nach Butler & Marcy (1996), Mayor & Queloz (1995) und Naef et al. (2004) und die von ihnen ermittelten orbitalen Parameter (Periode = 4.230785 Tage; $\varepsilon = 0$; $\omega = 0$; $K =$ halbe Amplitude der gemessenen RV = 0.056 km/s) eingetragen [5, 6, 7]:

:

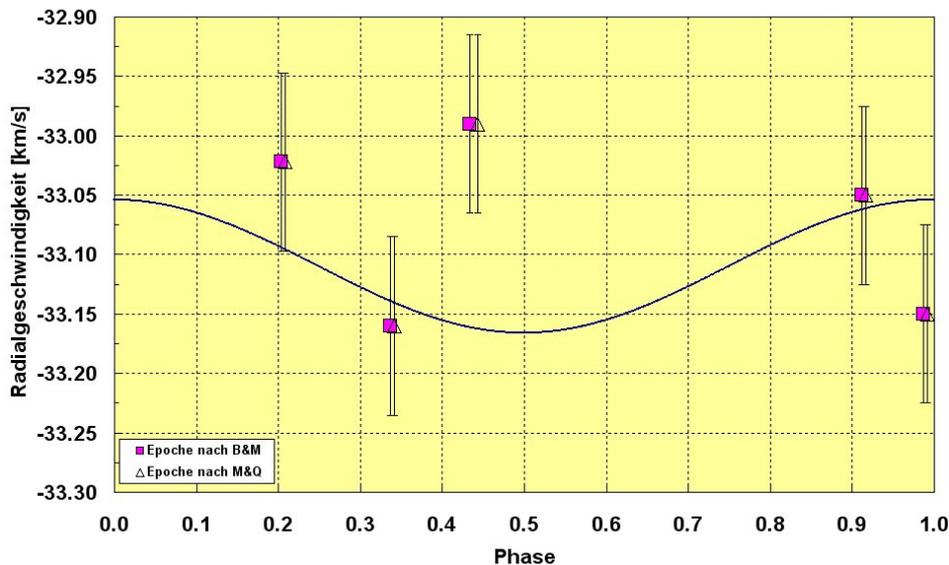


Abb. 17: Die mit SpecRave2.0 ermittelten, phasenbezogenen Radialgeschwindigkeiten (violette Quadrate = Epoche T_0 nach B&M; Dreiecke = Epoche T_0 nach M&Q) [5, 6]

Die ausgezogene Kurve gibt darin, basierend auf der Grundgleichung für spektroskopische Doppelsterne (aus: BAV-Einführung in die Beobachtung Veränderlicher Sterne, ISBN 978-3-00-021163-8, 2006, S. 66), den Verlauf der Radialgeschwindigkeit wieder nach:

$$Rv = K * [\cos(\varphi + \omega) + \varepsilon * \cos\omega] + V_0$$

Darin bedeuten:

- K** = halbe Amplitude der gemessenen RV = 0.059 (\pm) 0.003 km/s
- φ** = wahre Anomalie (*)
- ω** = Winkel zwischen aufsteigendem Knoten und Periastron = 0°
- ε** = Exzentrizität = 0
- V_0** = konst. Raumbewegung des Systemschwerpunktes = -33,11 km/s

(*) beschreibt als Winkelfunktion den zeitlichen Bahnablauf (Phase), der durch den Flächensatz festgelegt ist.

Als wichtig erschien es mir, die Phasenwerte der verschiedenen Ausgangsepochen von Butler & Marcy (1996, Quadrate) und von Mayor und Queloz (1995, Dreiecke) miteinander zu vergleichen.

Die Phase lässt sich dabei ganz einfach berechnen:

$$Phase = \frac{Beobachtungsdatum - Ausgangsepoche To}{Periode}$$

Um dieses Ergebnis weiter verbessern bzw. bestätigen zu können, habe ich die Radialgeschwindigkeit noch einmal mit einem – erst Anfang Januar 2012 erschienenen – anderen Programm berechnet.

Dieses ermittelt die RV auf Basis der Kreuzkorrelation (KK) und benötigt für eine möglichst genaue Bestimmung der RV ein Referenzspektrum (Template), dessen RV bereits berechnet wurde und daher bekannt ist. Beide Spektren werden im ersten Schritt in das neue, ebenfalls von Roland Bücke entwickelte Programm HRV-CC 2.0 hochgeladen.

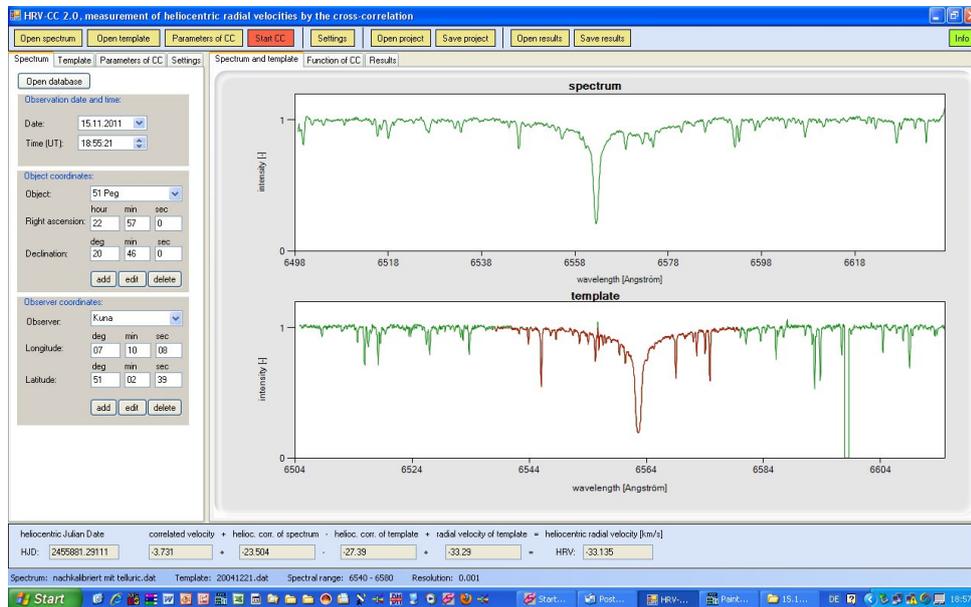


Abb.18: Hochladen, Eingabe der „Settings“ und Auswahl Spektralbereich

Als Template benutzte ich ein Spektrum aus dem ELODIE-Spektrenarchiv des Observatoire de Haute Provence (OHP) und wählte das „neuste“ aufgenommene und ausgewertete Spektrum aus (Aufnahme vom 21.12.2004) [20].

Auch in diesem Programm müssen für die RV-Berechnung alle „Settings“ (Ort, Zeit, Koordinaten) sowohl für mein eigenes Spektrum als auch für das Template eingegeben werden. Die für das Referenzspektrum bereits berechnete Radialgeschwindigkeit muss dem Softwareprogramm ebenfalls vorgegeben werden. Gleichzeitig wird ein Ausschnitt aus beiden Spektren gewählt, der näher untersucht werden soll,

da bei dieser Auswertungsmethode alle Spektrallinien verwendet werden. Mittels der angegebenen Daten und den beiden Spektren kann nun eine Funktionskurve auf Basis der Kreuzkorrelation erstellt werden.

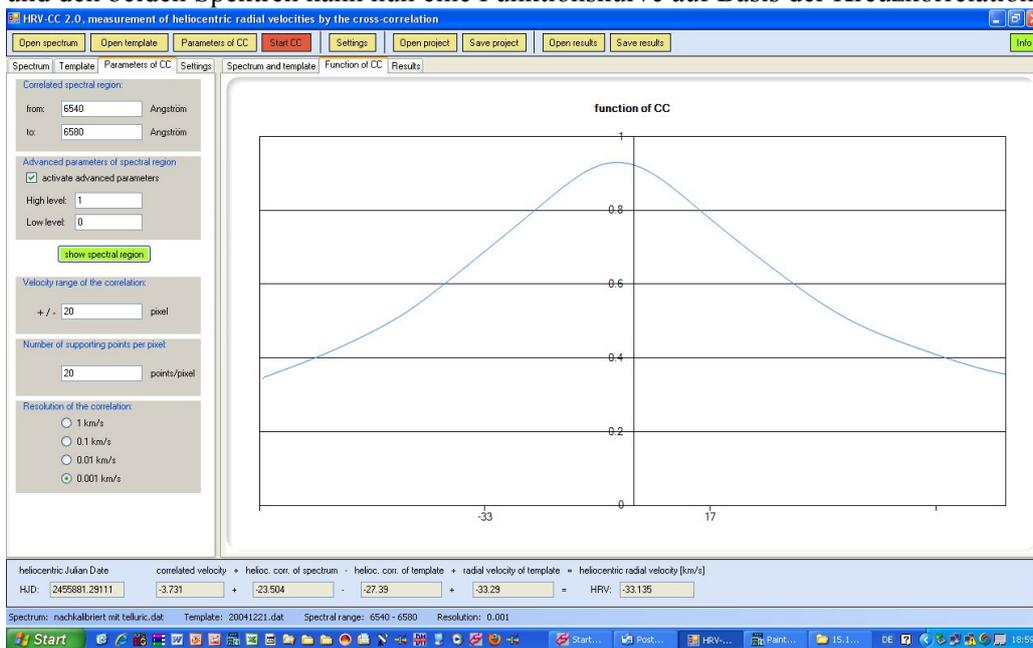


Abb.19: Erstellung der Funktion zur Kreuzkorrelation

Mittels der erstellten Funktionskurve kann nun die Radialgeschwindigkeit berechnet werden (HRV= heliozentrische RV). Auch diese Auswertungsmethode habe ich an allen 5 Spektren angewandt. Die mit der KK-Methode gefundenen RV-Werte sind in der nachfolgenden Tabelle den RV-Werten, die mit dem Programm SpecRave ermittelt wurden, gegenübergestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die KK-RV mit einem konst. Betrag über den SpecRave-RV liegen. Dieser, auf den Systemschwerpunkt (= konstante Raumbewegungskomponente des Systems 51 Peg = -33.11 km/s), bezogene RV-off-set resultiert daraus, dass mit einem Referenzspektrum (OHP-Template-Spektrum) gearbeitet worden ist, in dem die Linien des atmosphärischen Wasserdampfs bereits eliminiert waren, wogegen in meinen Spektren diese Linien (nicht zuletzt wegen ihrer erforderlichen Verwendung als Kalibrationshilfslinien) stets vorhanden waren. Hinzu kommen noch einige weitere, nicht zu vermeidende Restfehler in der Kalibrierung, die leicht zu einem variablen off-set führen können.

Datum	Uhrzeit	JD	Phase		RV mit SpecRave	RV mit Kreuz-Korrelation
			nach M&Q	nach B&M	[km/s]	[km/s]
15.11.2011	18:55:21	2455881.2884	0.917	0.912	-33.050	-34.24
21.11.2011	19:37:14	2455887.3175	0.342	0.337	-33.160	-34.37
28.11.2011	19:05:58	2455894.2958	0.991	0.987	-33.150	-34.41
29.11.2011	17:07:16	2455895.2134	0.208	0.203	-33.022	-34.42
30.11.2011	17:01:51	2455896.2096	0.443	0.434	-32.990	-34.26

Abb.20: Übersicht der Beobachtungsphasen nach M&Q u. B&M in Gegenüberstellung der SpecRave- und KK-Radialgeschwindigkeiten [5, 6].

Wie im Kapitel „Wellenlängenkalibration“ beschrieben, führte die Summe der quadratischen $\Delta\lambda$ aus allen Beobachtungen zu einer Messunsicherheit (Fehlerbalken im Phasendiagramm der Abb. 21) im Mittel von (\pm) 75 m/s, was einer prozentualen Abweichung von 0,227 % von der tatsächlichen Radialgeschwindigkeit entspricht!

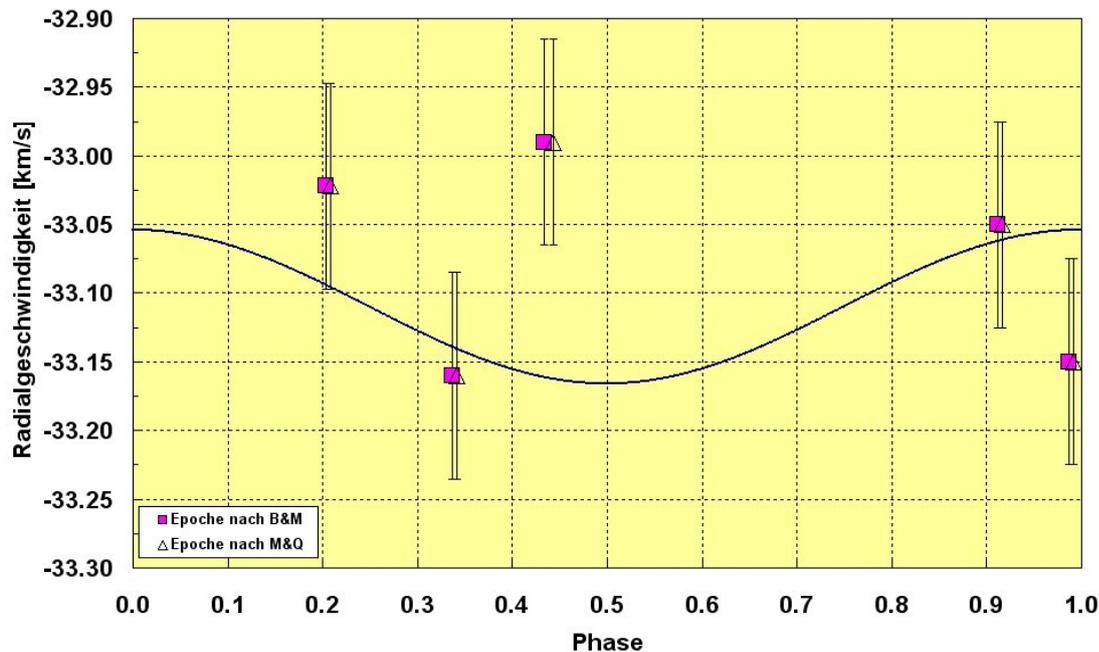


Abb.21: Endergebnis der Beobachtungen

6 Fazit

Abschließend lässt sich zu meiner diesjährigen „Jugend forscht“-Arbeit festhalten, dass ich angesichts der begrenzten technischen Möglichkeiten zwar keine wissenschaftlich verwertbaren Ergebnisse erhalten habe, gleichwohl im Rahmen der Streuung der individuellen Messungen aber plausible Werte in Anlehnung an die professionell ermittelten, phasenbezogenen Radialgeschwindigkeiten erhielt.

Da die Streuung der Messwerte in der Größenordnung der Radialgeschwindigkeitsamplitude liegt, benötigt man eine beträchtlich größere Anzahl an Messwerten, um die Periodizität der Radialgeschwindigkeit tatsächlich nachweisen zu können.

Auch möchte ich hervorheben, dass während des vergangenen Herbstes bzw. Winters kaum längere gute Wetterperioden vorhanden waren. So konnte ich letztlich nur in 5 verschiedenen Nächten jeweils meine Spektren aufnehmen. Hätten mir eine größere Anzahl an möglichen Beobachtungsnächten und Spektren zur Verfügung gestanden, hätte ich sicherlich mit umfangreicheren Messdaten die von 51 Peg b hervorgerufenen Schwankungen der Radialgeschwindigkeit von 51 Pegasi noch genauer reproduzieren können.

Durch meine begrenzte technische Ausstattung und den zuvor erwähnten meteorologischen Randbedingungen ergaben sich zusätzliche Probleme und Messungenauigkeiten, die ich u.a. durch Rauschminimierung, Verbesserung der Kalibrationsgenauigkeit durch Mehrfachkalibrierung, Auswertung und Überprüfung der RV mit zwei unterschiedlichen Programmen, Verwendung zweier Ausgangsepochen und Optimierung der Grenzsetzung bei der Kalibration des Spektrums zum Teil kompensieren konnte.

Den wichtigsten und größten Teil der Arbeit machte die praktische Umsetzung aus, die nicht immer einfach war. Dadurch, dass viel Praxis aber auch ein großes theoretisches Hintergrundwissen vorausgesetzt und erforderlich gewesen sind, habe ich einiges über die angewandte Astrospektroskopie lernen und meine letztjährige „Jugend forscht“-Arbeit („Beobachtung von Exoplaneten – mit den Möglichkeiten eines Amateurs“) thematisch erweitern können.

Bisher ist mir nur ein einziger Amateurastronom bekannt [18], dem es über einen deutlich längeren Zeitraum und zudem mit erheblich besserem Equipment (Echelle-Spektrograph) gelungen ist, die Radialgeschwindigkeitsperiodizität am System 51 Peg zu reproduzieren.

Quellen- und Literaturverzeichnis

Verwendete Literatur:

- [1] Brockhaus Enzyklopädie, 19.Auflage, Band 18, Mannheim 1988, S.11/12
- [2] Hannuschik, Reinhard: „List of telluric lines from UVES data“, 2006, unveröffentlicht
- [3] Walker, Richard: „Spektralatlas für Astroamateure“ Version 2.0, 2011, S.13
- [4] Pollmann, Ernst: „Die Reduktion von Spektren mit Giotto und VSpec“
- [5] Mayor, M., Queloz, D., Marcy, G., Butler, P., Noyes, R., Korzennik, S., Krockenberger, M., Nissenon, P., Brown, T., Kennelly, T., Rowland, C., Horner, S., Burki, G., Burnet, M., & Kunzli, M.: „51 Pegasi“, 1995, International Astronomical Union Circular, Nr.6251, S.1
- [6] Butler P. & Marcy G., „Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe“, IAU Colloquium No. 161, Juli 1996
- [7] Schneider, Jean: „Notes for 51 Peg“, 22.04.2005
- [8] Hopkins, Jeff: „Hydrogen Alpha Wavelength Calibration“, Hopkins Phoenix Observatory, 06.09.2008
- [9] Bücke, Roland; Jahns, Helmut: „Topozentric correction of spectroscopic radial velocities“, 2008
- [10] Bücke, Roland: „Die Anwendung der Kreuzkorrelation (KK) auf die Radialgeschwindigkeitsbestimmung astronomischer Objekte“, Hamburg
- [11] Pollok, H. Horst, „Quantitative Untersuchung des Hüllenspektrums von 28 Tauri (Pleione) im optischen Bereich“, Westfälische Wilhelms Universität, Münster 1982, S.172-183; S.200-205
- [12] Groever, Benedikt: „Untersuchung der Dynamik eines Supernovaüberrestes mit spektroskopischen Methoden“, Lore-Lorentz-Schule, November 2010 (Jugend forscht Arbeit 2011), S. 6-9
- [13] Schmidt-Kaler, Theodor; Diaz-Santamilla, Guillermo; Rudolph, Reinhard; Unger, Hartmut: „Quantitative Klassifikation von Sternspektren mittels Objektivprismenaufnahmen“, Forschungsberichte des Landes NRW Ausgabe Nr. 2595, Westdeutscher Verlag, Opladen 1976, S.12-14
- [14] Kieselbach, Kim Katharina; Oppermann, Mark; Schotte, Jan: „Relativbewegungen im Sonnensystem, beobachtet an Dopplerverschiebungen im Planetenspektrum“, Jugend forscht Arbeit 2008, S.5
- [15] Shelyak Instruments: „LHIRES III User Guide“, Version vom 10.10.2011, S.7 / 36 / 39

Verwendete Web-Dokumente:

- [16] „51 Pegasi b“: Artikel in WIKIPEDIA. URL.: http://de.wikipedia.org/wiki/51_Pegasi_b (letzter Zugriff: 10.01.2012, 14:39 MEZ)
- [17] „51 Pegasi“: Artikel in WIKIPEDIA. URL.: http://de.wikipedia.org/wiki/51_Pegasi (letzter Zugriff: 09.01.2012, 22:36 MEZ)
- [18] Buil, Christian: „Extrasolar“. URL.: <http://astrosurf.com/buil/extrasolar/obs.htm> (letzter Zugriff: 10.01.2012, 12:23 MEZ)

- [19] Pollmann, Ernst: „Active Spectroscopy in Astronomy“. URL.: <http://www.astrospectroscopy.de/> (letzter Zugriff: 08.01.2012, 19:29 MEZ)
- [20] „Display the spectrum (HD217014)“ in: The ELODIE archive. URL.: <http://atlas.obs-hp.fr/elodie/E.cgi?c=i&z=vs&o=elodie:20041221/0009> (letzter Zugriff: 09.01.2012, 15:33 MEZ)
- [21] „Dopplerverschiebung (Bild)“. URL.: http://www.weltderphysik.de/typo3temp/GB/2011_Dopplereffekt2-strahlung_wdp_22ae7ca7a3_cf10c692ea.png (letzter Zugriff: 10.01.2012, 15:46 MEZ)
- [22] „Dopplerverschiebung durch Hin- und Herwackeln des Sterns (Bild)“. URL.: <http://corot.de/Bilder/Doppler.jpg> (letzter Zugriff: 10.01.2012, 15:51 MEZ)
- [23] „Die Suche nach extrasolaren Planeten: Die Radialgeschwindigkeitsmethode“. Artikel in Corot: URL.: <http://corot.de/german/Exoplanet/Detektionsmethode.html> (letzter Zugriff: 10.01.2012, 15:52 MEZ)
- [24] „Direkter Nachweis des Exoplaneten 2M1207 b (Bild)“. URL.: http://www.mpia.de/Public/Aktuelles/PR/2011/PR111125/PR_111125_5.png (letzter Zugriff: 11.01.2012, 17:23 MEZ)
- [25] „Planet Quest“ of Jet Propulsion Laboratory/NASA: Exoplanetenzähler in: URL.: <http://planetquest.jpl.nasa.gov/> (letzter Zugriff: 11.01.2012, 17:29 MEZ)
- [26] „Extrasolarer Planet“. Artikel in: WIKIPEDIA. URL.: http://de.wikipedia.org/wiki/Extrasolarer_Planet (letzter Zugriff: 12.01.2012, 11:54 MEZ)
- [27] „2M1207 b“. Artikel in: WIKIPEDIA. URL.: http://de.wikipedia.org/wiki/2M1207_b (letzter Zugriff: 12.01.2012, 12:01 MEZ)

Verwendete Vorträge:

- [28] Schmitt, Peter: „Extrasolare Planeten“, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, 26.05.2008
- [29] Pollmann, Ernst: „Reduktion, Bearbeitung und Auswertung von Sternspektren“
- [30] Rauer, Heike: „Die Entdeckung und Charakterisierung extrasolarer Planeten“, Westfälische Wilhelms Universität, 21.10.2011
- [31] Bücke, Roland: „Die Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten“, Hamburg
- [32] Pollmann, Ernst: „Einsteigerkurs in die Astrospektroskopie“, Heppenheim 28.02.2009
- [33] Kohlmann, Thomas: „Exoplaneten Teil 1, Universität Erlangen, 23.11.2009