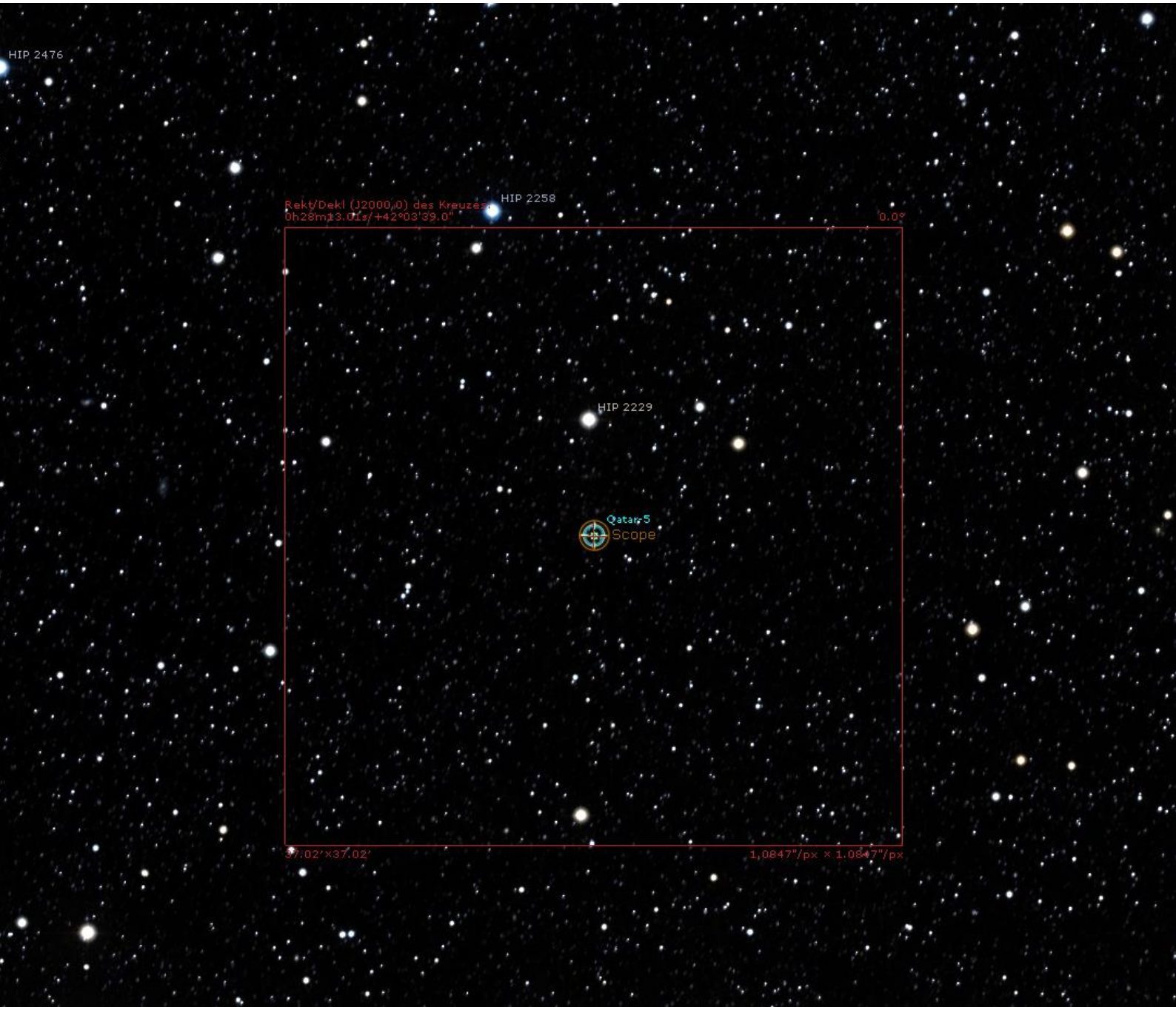
Nachweis des Exoplaneten Qatar-5 b durch die Transitmethode

Projektkurs Astronomie - Sven de Vrieze

Carl-Fuhlrott-Gymnasium Q1 2019/2020 Sven.devrieze@gy-cfg.de

Abgabe 20.05.2020 Betreuender Lehrer: Bernd Koch



Inhalt

Einleitung 4
Was ist ein Exoplanet und wann wurde der erste entdeckt? 5
Wie gelang es den ersten extrasolaren Planeten zu entdecken? 5
Wie findet man Exoplaneten? 7
Transitmethode 7
Radialgeschwindigkeitsmethode 7
Die direkte Methode 8
Transitbeobachtung Qatar-5 b am 30.12.2019 9
Auswahl des Planeten 9
Die Ankunft und Einrichtung der Geräte 9
Die Kamera 10
Belichtungszeit 11
„Flat-Bilder“ 11
Die Aufnahme des Transits 12
Auswertung der Beobachtung und Analyse der Ergebnisse 14
Die erste Bildbearbeitung durch „Flat-“ und „Dark-“ Bilder 14
Aufnahme der „Flat-“ und „Dark-“ Bilder 14
„Masterflat“ und „Masterdark“ erstellen 15
Abzug der „Master“ von den Aufnahmen 16
Analyse der Bilder mit Muniwin 16
Was ist Muniwin? 16
Analyse unserer Aufnahmen 17
Das Ergebnis 19
Upload der Ergebnisse bei ETD-Exoplanet 20
Was ist ETD? 20
Ablauf des Uploads 1/5 20
Ablauf des Uploads 2/5 21
Ablauf des Uploads 3/5 21
Ablauf des Uploads 4/5 und 5/5 23
Größenberechnung von Qatar-5 b 24

Vergleich der Ergebnisse mit den Katalogwerten 26
Größenvergleich 26
Vergleich mit vorherigen Messungen 27
Fehler unserer Messung 29
Literaturverzeichnis 30
Internetlinks 30
Bildverzeichnis 31
Abschlusserklärung 32

Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Thema Exoplaneten, mit Bezug auf die Beobachtung des Planetentransits von Qatar-5 b. Die zentrale Frage, welche durch diese Arbeit ihre Antwort finden soll besteht darin, wie man Exoplaneten entdecken und erkennen kann.

Ich habe dieses Thema ausgewählt, da ich mich schon länger für das Weltall und allem was ‚da draußen' ist und sein könnte interessiere. Im Projektkurs Astronomie habe ich mir dann ein Grundwissen in verschiedenen Bereichen der Astronomie aneignen können und entdeckt, wie viel Spaß und tiefergehendes Interesse ich an der Arbeit mit diesen Themen habe. Als es dann daran ging, eine Fragestellung oder ein Thema für die Projektrbeit zu finden, kamen mir viele verschiedene Ideen in den Sinn. Beispielsweise die Mondfotografie oder die Deepsky-Aufnahmen, also Fotos von sehr weit entfernten Objekten, um nur zwei zu nennen. Für Exoplaneten entschied ich mich schlussendlich, da ich schon viel über diese gehört und gelesen habe und sie aktuell in aller Munde waren. Mich packte da die Neugierde und ich wollte mich selber mal mit dem Thema beschäftige – mehr als nur eigene Recherche und Theoretisches.

Im Folgenden wird nun zuerst erklärt, was ein Exoplanet überhaupt ist und was ihn auszeichnet. Des Weiteren wird darauf eingegangen, wie der erste Exoplanet entdeckt wurde und was das auch noch heute für eine Rolle spielt.

Weitergehend werden mehrere Methoden, welche auf verschiedenen Weisen zur Entdeckung und Berechnung von diesen Planeten genutzt werden, erläutert und einige ihrer Vorteile sowie Nachteile diskutiert. Die Transitmethode wird nicht nur erklärt, sondern wurde auch für die Beobachtung des Planeten Qatar-5 b genutzt.

Diese Beobachtung wird ebenfalls erläutert und daraufhin genauer betrachtet werden. Die verschiedenen Schritte die für eine solche Beobachtung nötig sind werden dabei erläutert und im Anschluss vergleiche ich meine Ergebnisse mit anderen Beobachtungen. Dabei wird auch auf mögliche Fehler und Ungenauigkeiten eingegangen.

Die Arbeit hält in erster Linie die Erfahrung, welche ich mit den verschiedenen Programmen und Geräten sammeln konnte, fest, dient aber auch dazu, weiteren Astronomie- und Exoplanetenbegeisterten, Informationen, sowie neue Möglichkeiten zu bieten. So wird in dieser Arbeit recht genau beschrieben, wie ich vorgegangen bin, um zu meinen Ergebnissen zu gelangen und man kann sich vielleicht das ein oder andere davon abschauen.

Was ist ein Exoplanet und wann wurde der erste entdeckt?

Die Frage, was ein Exoplanet ist, lässt sich recht kurz beantworten: Ein Exoplanet, auch als extrasolarer Planeten bezeichnet, ist ein Planet außerhalb unseres Sonnensystems. Also unabhängig vom Einfluss unserer Sonne, dem Stern, der unsere Leben in Tag und Nacht teilt und uns erst das Leben ermöglicht. Dabei ist es egal, ob es sich um einen Gas- oder einen Gesteinsplaneten handelt.

Der erste extrasolare Planet wurde von Michel Mayor und Didier Queloz im Jahr 1994 entdeckt. Die Entdecker veröffentlichten ihren Fund jedoch erst am 6 Oktober 1995 auf einer Tagung in Florenz. Beide Physiker stammen aus der Schweiz und studierten an der Universität Genf. Für ihre Entdeckung erhielten sie die zweite Hälfte des Physik-Nobelpreises 2019. Die andere Hälfte bekam der kanadische Physiker James Peebles für seine Theorie des Urknalls und die Entwicklung des Universums. Der erste entdeckte Exoplanet heißt Dimidium beziehungsweise 51 Pegasi b und umkreist den sonnenähnlichen Stern Helvetios, welcher etwa 10% mehr Masse hat als die Sonne und etwa 51 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Den Namen 51 Pegasi b erhielt er, da der Exoplanet den Stern im Sternbild Pagasus umkreist. [TQ2/TQ3]

Wie gelang es den ersten extrasolaren Planeten zu entdecken?

Bei der Entdeckung von Mayor und Queloz spielte die Spektroskopie eine entscheidende Rolle, denn das direkte Beobachten von Planeten war unmöglich. Diese wurden einfach von ihrem Mutterstern überstrahlt, da sie selbst nicht leuchten. Ein solcher Spektrograph macht winzige, periodische Verschiebungen im Lichtspektrum sichtbar. Das Lichtspektrum zeigt die Wellenlänge des sichtbaren Lichts, welches lediglich elektromagnetische Strahlung ist. Je kürzer die Wellenlänge der Strahlung ist, desto höher ist die Frequenz und umso höher ist auch die Energie, die ein Lichtquant in sich trägt, also die sogenannte Photonenenergie.

Anhand der Abbildung kann man erkennen, dass diese Photonenenergie von rechts nach links steigt, also von Infrarot (IR) zu Ultraviolett (UV). Violettes Licht hat somit eine höhere Photonenenergie als rotes. [TQ 4]

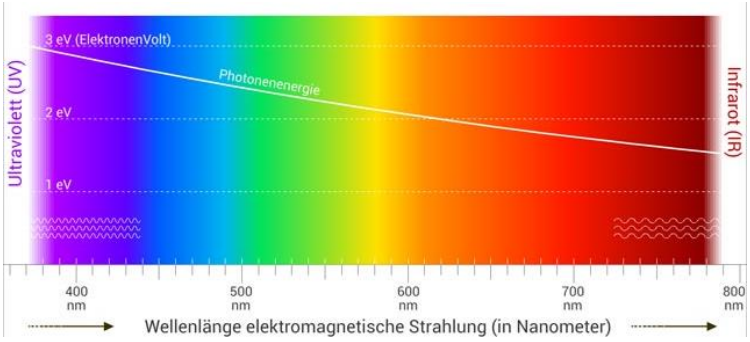


Abb 1: Lichtspektrum [BQ1]

„Solche Verschiebungen [im Lichtspektrum] entstehen, wenn die Schwerkraft eines Planeten im Orbit auf den Stern wirkt. Der Stern gerät dadurch ins Taumeln und sein Licht spiegelt dies wider.“ [TQ1]

Ein solches Taumeln fanden sie bei einem Stern, welcher etwa 51 Lichtjahre entfernt vom Planeten Erde liegt. Dieses Spektrum des Taumelns findet sich in unserem Sonnensystem bei der Sonne wieder. Hierbei taumelt die Sonne mit einer geschätzten Geschwindigkeit von zwölf Metern pro Sekunde um das Massenzentrum, verursacht durch die Schwerkraftwirkung des Jupiters. Daraus ließ sich schließen, dass sich im Orbit um 51 Pegasi ein schwerer Planet befinden müsse. Dieser wird als Gasriesen oder als heißer Planeten bezeichnet, sprich der Exoplanet hat eine ähnliche Masse wie der Jupiter und besteht hauptsächlich aus leichten Gasen, wie Wasserstoff und Helium. Der Gasplanet, beziehungsweise Gasriese, umkreist seinen Stern in nur vier Tagen einmal, was vermuten lässt, dass jener in einem geringen Abstand zu seinem Muttergestirn steht. [TQ1/TQ2]

Queloz, welcher für die Auswertung der Messungen zuständig war, glaubte zunächst nur an einen Fehler, denn vier Tage als Umlaufzeit schienen für einen Planeten dieser Größe zu wenig. Er wagte es deshalb erst im Januar des nächsten Jahres, also des Jahres 1995, seinem Doktorvater und Leiter des Projekts, Mayor den Fund zu offenbaren. Erst im Juli des Jahres waren sie sich wirklich sicher, einen fremden Planeten entdeckt zu haben, da sie ihn auch mit einer anderen Methode nachweisen konnten. Weitere drei Monate später brachten sie ihre Entdeckung auf einer Tagung in Italien dann an die Öffentlichkeit. [TQ5]

Mayor und Queloz waren aber schon zu ihrer Zeit nicht die Einzigen, die auf der Suche nach Exoplaneten waren. Ihr größter Konkurrent war eine Forschergruppe um Geoffrey Marcy welche von der University of California in Berkley aus arbeiteten. Mayor und Queloz wussten, welche Sterne die Gruppe beobachtete und konzentrierten sich deshalb auf andere. Schlussendlich gelang ihnen die Entdeckung zuerst, da Marcy und sein Team nicht mit der Auswertung der vielen, von ihnen gesammelten Daten hinterher kamen. Sie fanden wenige Monate nach der Veröffentlichung über 51 Pegasi b zwei weitere jupiterähnliche Planeten, welche um andere Sterne kreisten. [TQ5]

Wie findet man Exoplaneten?

Es gibt einige verschiedene Methoden, Exoplaneten aufzuspüren. Hier werden im Folgenden drei Varianten vorgestellt. Natürlich bringt jede Art Vorteile, sowie Nachteile mit sich, es gibt also nicht *die* Methode der Exoplanetenentdeckung.

Transitmethode

Eine Möglichkeit, die auch für die Beobachtung des Planeten Qatar-5 b in dieser Arbeit verwendet wurde, ist die Transitmethode. Dabei wird die Helligkeit eines Sterns gemessen. Wandert ein Planet zwischen Stern und Beobachter her, so ist ein charakteristischer Abfall in der Lichtkurve erkennbar. Dieser Lichtabfall ist zwar sehr gering; so gering, dass wir ihn selbst bei einem Transit von Merkur oder Venus vor der Sonne nicht wahrnehmen können aber mit heutigen Teleskopen messbar. Um sich sicher sein zu können, dass tatsächlich ein Planetentransit diesen Lichtabfall verursacht hat, muss dabei ein Stern über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Tritt dieser Lichtabfall in gleichmäßigen Abständen auf, so ist wahrscheinlich ein Planet der Grund dafür. Wenn nur ein einziger, vermutlicher Transit gemessen wird, muss das nicht heißen, dass ein Planet vorliegt, da es auch verschiedene andere Gründe gibt, weshalb ein Stern sich verdunkeln kann. Eine genaue Aufschlüsselung der Durchführung dieser Methode folgt ab Seite 9, in dem Bericht meiner eigenen Beobachtung des Planeten Qatar-5 b. [TQ6]

Radialgeschwindigkeitsmethode

Die Technik, mit der der erste Exoplanet gefunden wurde, nennt man Radialgeschwindigkeitsmethode oder Wackeleffekt. Dabei wird sich die Tatsache zu Nutze gemacht, dass nicht nur die Gravitation eines Sterns auf seine(n) Planeten wirkt, sondern auch die Gravitation des Planeten auf seinen Mutterstern. Daraus ergibt sich, dass nicht der Planet um den Mittelpunkt des Sterns kreist, sondern beide sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt drehen. In den Abbildungen wird dies veranschaulicht.

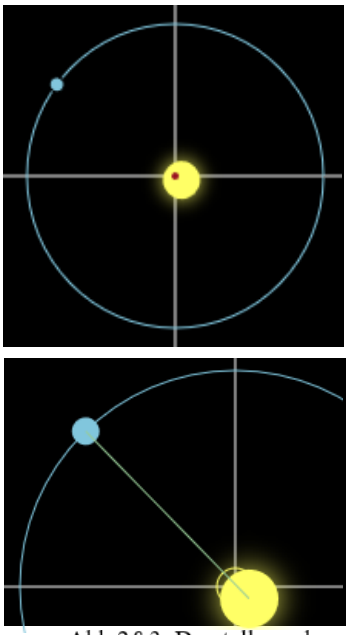


Abb 2&3: Darstellung der Gravitationswirkung [BQ2]

In Abbildung 2 ist blau die Umlaufbahn des Planeten um den Stern, mit dem Planeten als blauem Punkt und dem Stern, gelb in der Mitte dargestellt. Der gemeinsame Schwerpunkt liegt im roten Punkt, deshalb ist eine Verschiebung des Sterns zu erkennen. In Abbildung 3 ist nicht mehr der Mittelpunkt markiert, jedoch ist die Bahn des Sterns eingezeichnet. Dadurch wird verdeutlicht, dass der Planet zwar eine weit längere Bahn hat als sein Stern, diese aber auch nicht nur ‚rumsteht', sondern sich auf seiner eigenen Bahn dreht. Dabei liegt das Zentrum der Schwerkraft immer mit den Mittelpunkten beider Planeten auf einer Linie.

Betrachtet man nun, von der Erde aus, einen Stern, bei welchem wir nicht direkt von oben also wie in den Abbildungen auf Stern und Planet schauen, so ist die Bahn des Sterns nicht mehr nur ein flacher Kreis, sondern eine Bewegung, etwas auf uns zu und wieder etwas von uns weg.

Nach dem Prinzip des Dopplereffektes wird dabei das Licht des Sterns gestreckt und wieder gestaucht, also rot- und blauverschoben (verdeutlicht in Abbildung 1, S. 5). Das bedeutet, dass die Radialgeschwindigkeit des Sterns sich ändert.

Da auch diese Schwankungen charakteristisch sind und immer wieder auftreten, lassen sie sich gut messen. Die Radialgeschwindigkeitsmethode eignet sich aber hauptsachlich zum Entdecken großer, beziehungsweise massereicher Planeten, da die Gravitation des Planeten bei mehr Masse stärker wird und dadurch auch das ‚wackeln' des Sterns stärker ausgeprägt ist.

Das ist auch der Grund, warum mit dieser Methode meist Planeten mit recht geringem Abstand zum Stern gefunden werden, denn je weiter der Planet entfernt ist, desto geringer ist auch sein Einfluss auf den Stern. Dieser geringere Einfluss auf den Stern führt dann dazu, dass selbiger schwieriger zu messen ist, da die Änderung der Radialgeschwindigkeit ebenfalls geringer wird. [TQ6]

Die direkte Methode

Es ist dank der heutigen Technik auch die direkte Methode möglich. Dabei wird, wie der Name vermuten lässt, versucht, Exoplaneten direkt zu beobachten. Bei den vorher genannten Methoden wird der Stern und dessen verhalten analysiert und so auf Planeten geschlossen. Bei der direkten Methode sind die Exoplaneten an sich sichtbar und werden dadurch gefunden. Es ist (noch) nicht möglich, die tatsächliche Planetenoberfläche erkennbar zu machen. Vielmehr sind die Planeten auf Bildern nur als kleine Punkte sichtbar; und auch das erst nach einer anspruchsvollen Nachbearbeitung der Bilder. Diese Variante der Beobachtung exosolarer Planeten kann sowohl mit sehr leistungsstarken Teleskopen auf der Erde vorgenommen werden, sowie auch durch Weltraumteleskope passieren. Weltraumteleskope, wie zum Beispiel das Hubble Teleskop haben dabei den Vorteil, dass sie durch ihre Position in der Umlaufbahn der Erde nicht das Problem von Bildverunreinigungen durch die Atmosphäre haben. Auf diese Art werden am besten, im Gegenteil zur Radialgeschwindigkeitsmethode, Planeten entdeckt, die mit sehr großem Abstand um ihren Stern kreisen. [TQ6]

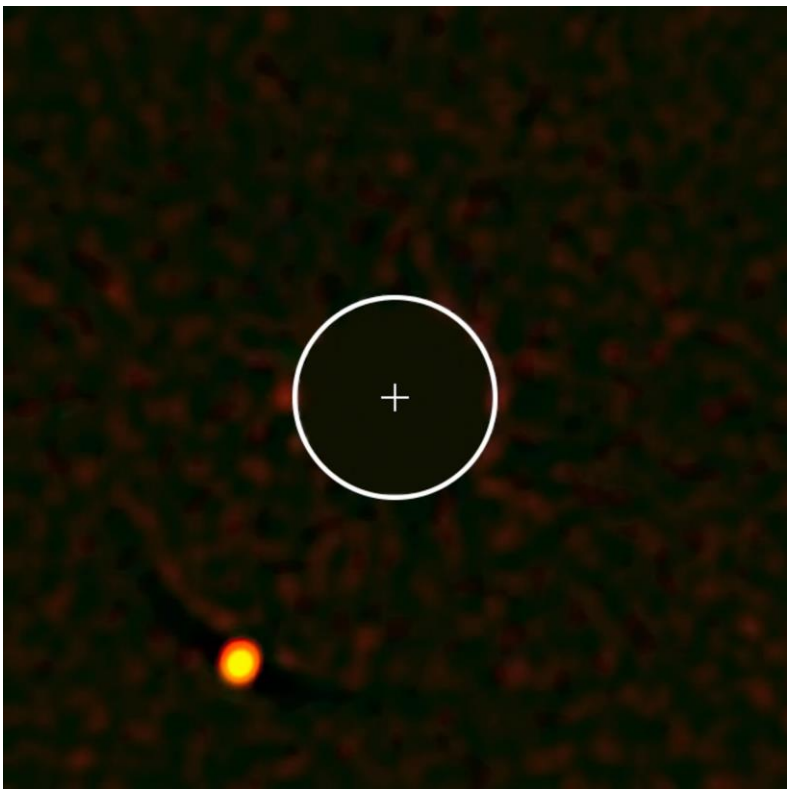
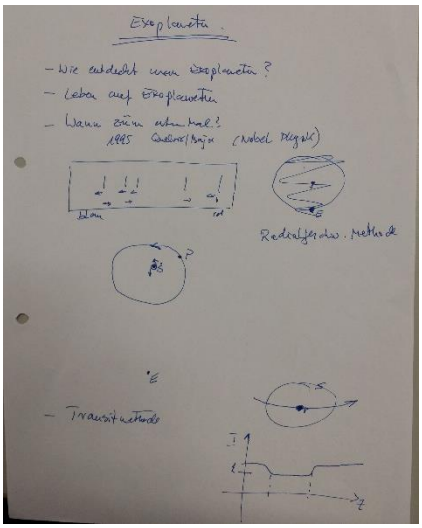


Abb 3: Direkte Aufnahme des Exoplaneten HIP65426b. Der Kreis in der Mitte verdeckt, zum Schutz der Kamera den Stern [BQ12]

Transitbeobachtung Qatar-5 b am 30.12.2019

Auswahl des Planeten



Da ich schon sehr schnell wusste, welches Thema die Projektarbeit behandeln sollte, habe ich mich auch nach den Stunden, in denen uns ein gewisses generelles astronomisches Wissen vermittelt wurde, direkt auf das Thema Exoplaneten und die Strukturierung der Projektarbeit fokussiert. Die Abbildung zeigt die ersten von Herrn Koch angefertigten Notizen dazu, wie die Arbeit, sehr grob, aussehen soll und einige Zeichnungen zu Veranschaulichung dessen, was er mir erklärte. Im unteren Drittel ist die Skizze dessen, was bei einem Planetentransit gemessen werden kann und wie die Lichtkurve aussehen würde, zu erkennen. Damit war der Startschuss für die Beobachtung, welche einige Zeit später, im Dezember stattfinden sollte, gegeben.

Dass der Planet Qatar-5 b beobachtet wird, stand noch nicht von Anfang an fest. Bei der Auswahl des Planeten haben wir uns lediglich danach gerichtet, wann ein passender Planet, gegen frühen Abend, also vor Mitternacht, von der Schule am Hahnerberg aus gut zu beobachten ist und wann sich das Wetter für eine Beobachtung eignet, es also weder bewölkt noch regnerisch ist.

Die Auswahl des Planeten fand über die EDT Exoplanet Internetseite [IL1] statt. Diese Seite zeigt zu einem eingegebenen Standort alle bekannten Transits an, welche zu beobachten sind. Hierbei werden also Sterne mit unter dem Horizont oder tagsüber stattfindenden Transits direkt ausgeschlossen. Es gab ein paar Planeten, bei denen die Beobachtung überlegt wurde, diese wurden dann aber wegen schlechtem Wetter oder anderen Umständen wieder verworfen.

	Peg	54°,SW	**43°,W**	32°,W				RA: 23 18 29.54 DE: +24 53 21.4
Qatar-5 b	And	19:03 71°,W	**30.12. 20:31 57°,W**	21:58 44°,W	174.5	12.62	0.0119	57336.758242+2.8792319*E RA: 00 28 12.94 DE: +42 03 40.9
Qatar-1 b	Dra	20:01 40° NW	**30.12. 20:49 37° NW**	21:38 33° NE	96.7	12.84	0.0204	55518.4102+1.4200246*E RA: 20 13 32

Abb 5: Vorhersage des Transits [BQ3]

Irgendwann im Dezember bekam ich dann den in der Abbildung vorliegenden Bildausschnitt von Herrn Koch gesendet, mit der Frage, ob diese Beobachtung für mich funktionieren würde. Im Bild zu sehen sind die Daten des Planeten Transits von Qatar-5 b am 30.12.2019, beginnend um 20:03 Uhr deutscher Zeit (MEZ) und endend um 22:58 Uhr.

Die Ankunft und Einrichtung der Geräte

Um alles noch vorbereiten zu können, machte ich mich auf den Weg, um gegen 16:30 an der Sternenwarte zu sein. Dort haben wir dann die Kamera angebracht, den PC gestartet und das Teleskop ausgerichtet. Danach hieß es: Warten auf den Transit. Sowohl das Teleskop, als auch die Kamera lassen sich ganz bequem über den Computer, also aus dem beheizten Häuschen auf dem Schuldach steuern. Das hat die Beobachtung bei kühlem Dezemberwetter um einiges angenehmer gemacht.

Das Ausrichten des Teleskops wurde über das Programm „Stellarium“ gemacht. In diesem Programm kann nach einem Stern oder Planeten gesucht werden und wenn die richtige Beobachtungsposition ausgewählt ist und das Programm über das Internet Zugriff auf das Teleskop hat, kann es dieses recht genau auf das gesuchte Objekt ausrichten. In Abbildung 6 (auf der nächsten Seite) ist ein Ausschnitt des Programms dargestellt. Dort erkennbar ist auf der rechten Seite (eigentlich in der Mitte des Bildschirms) ein Türkiser Kreis mit dem Text „Qatar-5“, welcher anzeigt, dass der Stern Qatar-5 ausgewählt wurde.

Am linken Rand sind einige Informationen zum ausgewählten Objekt angegeben, zum Beispiel die Klasse, Helligkeit und noch viele mehr. Im Hintergrund sind andere Sterne und Himmelskörper dargestellt und auch die Sternkreiszeichen illustriert. Da der Computer, an dem das Programm zur Zeit der Aufnahme ausgeführt wurde, mit dem Teleskop verbunden war, ist noch eine weitere, sehr wichtige Information vorhanden. Nahe am rechten Rande der Abbildung ist ein orangenes Symbol mit der Beschriftung „Scope“ sichtbar. Dieses stellt die aktuelle Ausrichtung des Teleskops dar, also welche Himmelsstelle im Moment damit beobachtet werden kann. Gibt man dem Programm dann die Anweisung, das Teleskop auf den ausgewählten Stern auszurichten, wird das Teleskop so ausgerichtet, dass beide Kreise übereinander liegen. Da die Daten im Programm nicht perfekt sind, weicht die tatsächliche Position des Sterns im Bild leicht von der Mitte ab. Diese Abweichung ist aber kein Problem, da der aufgenommene Ausschnitt des Himmels groß genug ist.

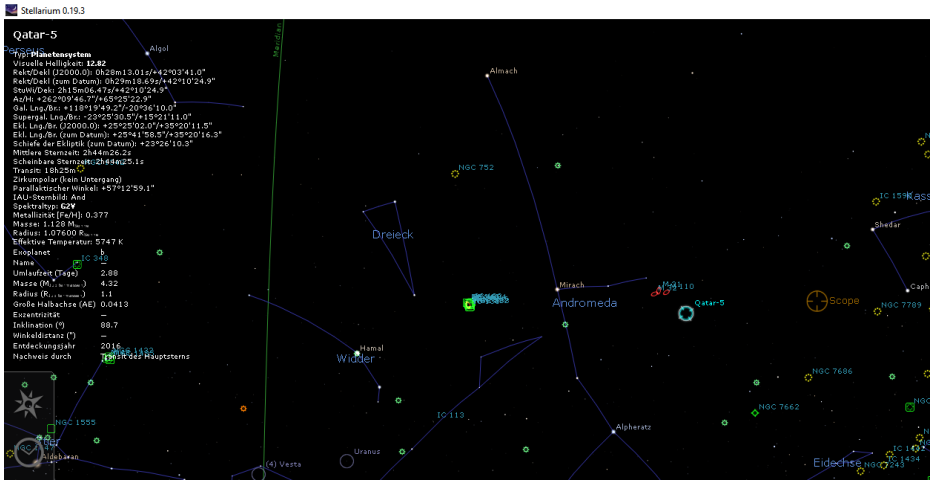


Abb 6: Bildausschnitt „Stellarium“ [BQ4]

Die Kamera

Als nächstes musste die Kamera angebracht und in Betrieb genommen werden. Die Kamera, eine SBIG STX-16803 M [Abb 7], wird ans Ende des Teleskops angesetzt, gesichert und über mehrere Kabel mit dem Computer und dem Teleskop verbunden. Die Kamera hat, da sie für die Astronomie vorgesehen ist, eine besondere Funktion, welche die meisten herkömmlichen Kameras nicht haben. In Abbildung 8 ist das Kontroll-Fenster zu sehen, dort kann neben den gängigen Einstellungen der Kamera, also zum Beispiel Belichtungszeit oder dem ISO Wert, auch die Temperatur des Sensors eingestellt werden. Sichtbar ist diese Einstellung im mittleren Fenster, im unteren Bereich der Abbildung. Dort ist erkennbar, dass die Temperatur von -30 Grad Celsius eingestellt worden ist. Dieses Modell kann den Sensor bis zu 40K unter Umgebungstemperatur herunterkühlen.

Diese Funktion ermöglicht eine höhere Belichtungszeit ohne Bildprobleme. Denn da bei der Astrofotografie auch Belichtungszeiten von mehreren Minuten vorkommen, ist es nötig, dass der Sensor gekühlt wird.

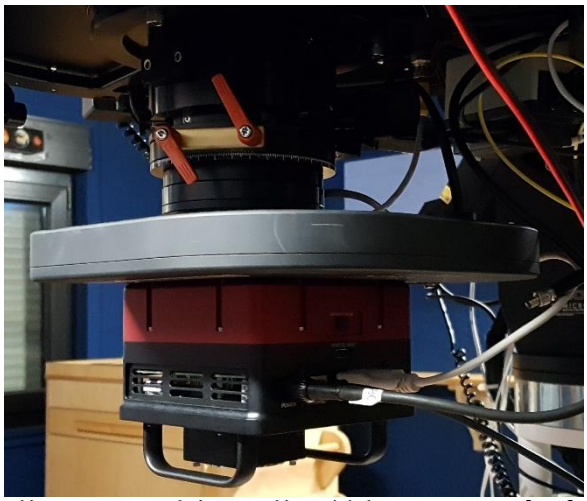
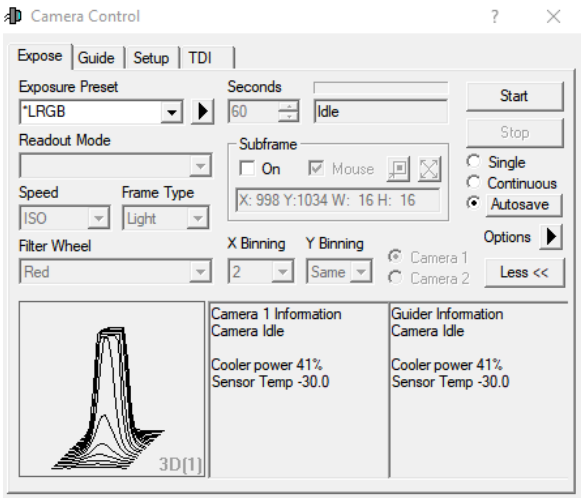


Abb 7: Kamera am Teleskop ↑↓ Abb 8: Digitale Kamerasteuerung [BQ5]



Die Kühlung des Sensors sorgt für weniger so genannte „Hotpixel“ und damit für ein geringeres Rauschen im Bild, also eine bessere Auflösung des Bildes. Bei der Fotografie lichtschwacher Objekte werden, wie auch auf den nächsten Seiten beschrieben, ebenfalls einige andere Methoden verwendet um Rauschen oder Dreck im Bild zu verhindern, den Sensor kühlen ist eine weitere.

Belichtungszeit

Nach dem Anbringen der Kamera und dem Ausrichten des Teleskops, konnten wir noch immer nicht mit den Aufnahmen beginnen. Denn nun musste noch eine geeignete Belichtungszeit ausgewählt werden. Ein Blick auf die Daten anderer, die den gleichen Planeten bereits bei seinem Weg vor dem Stern her beobachteten, was über ETD-Exoplanet [IL1] sehr einfach geht, zeigte, dass die meisten eine Belichtungszeit von 120 Sekunden nutzten. Nach einigen Testaufnahmen des Sterns beziehungsweise natürlich auch des Himmels drumherum, stellte sich die Belichtungszeit von 120 Sekunden auch für uns als passend heraus. In Abbildung 9 ist der Graph abgebildet, welcher die Helligkeit der einzelnen Pixel auf einer Linie, hier unten Links im Bildausschnitt, anzeigt. Dort ist erkennbar, dass der hellste Pixel des Sterns auf dem Bild knapp unter 20000 liegt. Das ist sehr gut, da das auch die maximale Helligkeit ist, die die Kamera aufnehmen kann und weil das Bild bei einer längeren Belichtungszeit überbelichtet wäre, da mehr Licht den Sensor trifft, als diese verarbeiten kann. Dadurch wäre die geringe Änderung der Helligkeit des Sterns nicht mehr messbar. Bei dieser Einstellung ist der Stern so hell, dass alle Messungen gut durchführbar sind und die Analyse funktioniert.

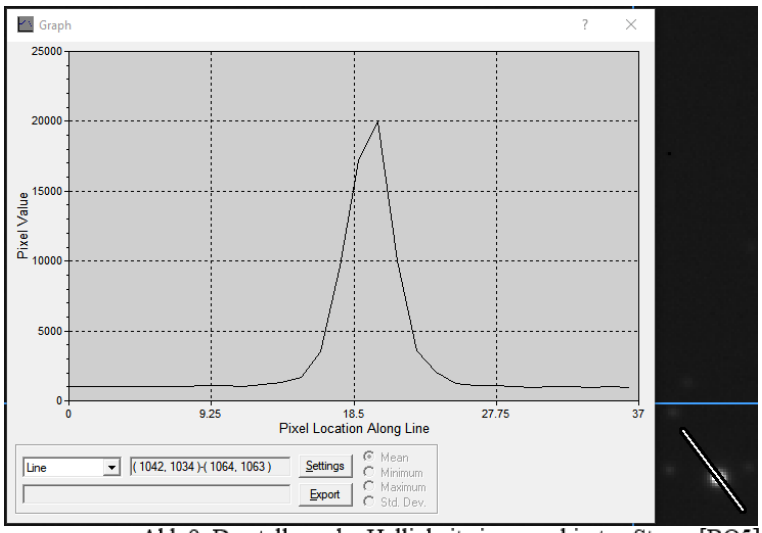


Abb 9: Darstellung der Helligkeit eines markierten Sterns [BQ5]

„Flat-Bilder“

Doch auch danach begannen wir zwar mit den Aufnahmen, jedoch nicht mit dem Planetenaufnahmen, sondern mit den Aufnahmen der sogenannten „Flat“ Bilder. Dabei wird entweder der Himmel, wenn dieser halbwegs gleichmäßig hell ist oder ein LED-Licht aufgenommen. Diese sogenannten „Skyflats“ oder „LEDFlats“ dienen dazu, den natürlichen Lichtabfall zum Rande des Bildes auszugleichen. Denn durch die Abschattung im Teleskop kommt es dazu, dass auf einem eckigen Bild die Ränder beziehungsweise die Ecken des Bildes weniger hell sind, als die Mitte. Auf einem Flat wird dieser Unterschied aufgenommen und kann, da auf diesem nichts anderes abgebildet ist, dann vom fertigen Bild abgezogen werden. Dabei nutzt ein Programm das Flat, um die Aufnahme in ihrer Helligkeit so zu korrigieren, dass das Bild gleichmäßig hell ist. Dabei werden, nach Abzug der Darkframes, die Rohbilder des Exoplaneten durch die Flats dividiert. Die Abbildung zeigt Sven de Vrieze beim Anbringen des LED-Lichtes. Dadurch, dass die Flats durch die gleiche Linse wie die tatsächlichen Aufnahmen gemacht werden, ergibt sich dadurch noch ein Vorteil.

Abb 10: Sven de Vrieze neben dem Teleskop [BQ5]

Denn Dreck und Verunreinigungen der Linse, welche aus den fertigen Bildern nicht zu entfernen wären, können so, durch die Division eines Flats, ebenfalls entfernt werden, was dann wieder die Bildqualität der Aufnahmen steigert.

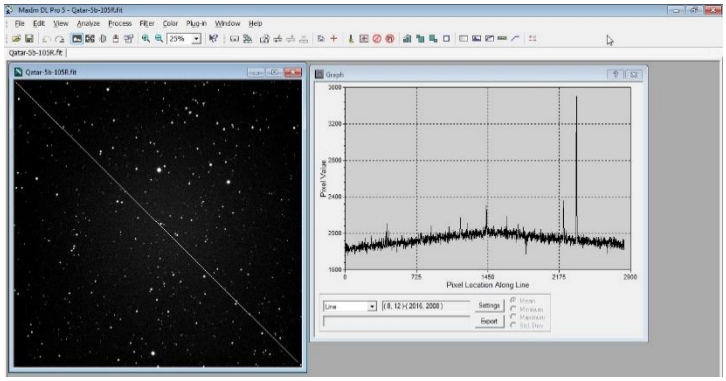
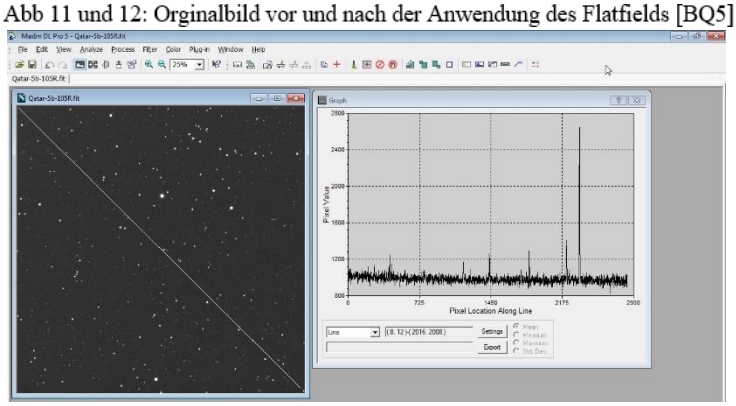


Abb 11 und 12: Orginalbild vor und nach der Anwendung des Flatfields [BQ5]



In den Abbildungen ist dargestellt, wie diese Veränderung bei der tatsächlichen Anwendung aussieht. Das aufgenommene Bild (Abb 11) wurde direkt in das Programm eingefügt. In dem Diagramm auf der rechten Seite ist wie bei Abbildung 9 [Seite 11], die Helligkeit der Pixel auf einer Linie im Bild dargestellt. Die Linie verläuft hier von links oben nach rechts unten. Im Diagramm ist zur Mitte hin ein Verlauf nach oben zu erkennen, das Bild wird also zur Mitte hin heller. In Abbildung 11 wurde das sogenannte „Masterflat“ dividiert. Dieser Vorgang wird ab Seite 15 erklärt. In dem entstandenen Bild ist die gleiche Analyse der Helligkeit vorgenommen worden. Im Diagramm ist erkennbar, dass die Helligkeit zwar nicht überall genau gleich ist, sondern nach rechts unten etwas abnimmt. Da diese Abnahme aber sehr gering ist und die Helligkeit überwiegend gleich ist, ist das nicht schlimm. Die einzelnen ‚Ausreißer‘ sind Sterne, welche zufällig auch auf der Linie liegen.

Die Aufnahme des Transits

Die eigentliche Aufnahme des Transits war dann recht unspektakulär. Abbildung 13 zeigt Sven de Vrieze bei der Überwachung der Aufnahmen, Abbildung 14 zeigt die Bedienelemente der Aufnahmen. Links ist das zuletzt aufgenommene Bild. In der Mitte das Feld zu Kontrolle der Kamera, über welches die Kamera auch gesteuert und die Serienaufnahme gestartet wird. Rechts die Liveübertragung des Teleskops zur Kontrolle, zur Überwachung, dass dort nichts passiert, was nicht passieren soll. Bei dieser Übertragung ist das Bild schwarz/weiß, da die Kamera mit Infrarotlicht arbeitet, welches klare Aufnahmen auch bei Nacht ermöglicht, ohne

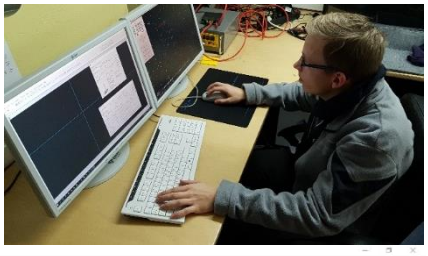
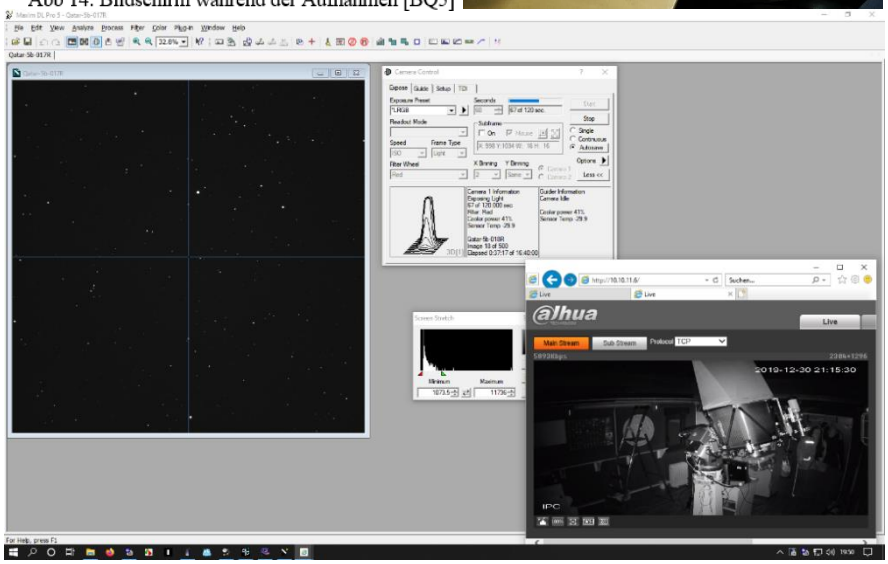


Abb 13: Sven de Vrieze am Computer [BQ5]

Abb 14: Bildschirm während der Aufnahmen [BQ5]



dabei die Aufnahmen des Teleskops zu stören. Denn dieses, beziehungsweise die Kamera, welche zur Aufnahme genutzt wird, kann das Infrarotlicht nicht wahrnehmen. Zusätzlich war das Teleskop mit einem Rotfilter ausgestattet.

Der Transit sollte laut Katalogwerten, also den zuerst gemessenen Daten, um kurz nach 20 Uhr beginnen. Damit klar sichtbar wird, wann der Transit beginnt und endet, haben wir um 19:15 Uhr mit den eigentlichen Transitaufnahmen begonnen. Zu Beginn scheint die Helligkeit des Sterns konstant, nimmt dann ab, bleibt eine Zeit bei geringerer Helligkeit und nimmt dann wieder zu, um etwa zu den gleichen Werten wie vor dem Transit zu gelangen. Also wird dem Computer um 19 Uhr die Anweisung gegeben, eine Serie von Bildern mit einer Belichtungszeit von je 120 Sekunden zu machen. Damit die Aufnahme nicht abbricht, wurde die Serie mit 500 Bildern angesetzt. Diese Anzahl an Bildern aufzunehmen würde zwar über 16,5 Stunden dauern, die Aufnahme kann aber jederzeit manuell beendet werden. Da der Transit kurz vor 23 Uhr enden sollte, haben wir die Aufnahmen gegen 23:45, also nach etwa viereinhalb Stunden beendet. In der Zwischenzeit ist nicht viel passiert, da der Computer alles quasi von selber gemacht hat. Es hieß also warten, Abendessen und weiter warten.

Abb 15: [BQ5]
Das für die Aufnahmen
Genutzte 0,5m CDK20
Teleskop auf dem Schuldach

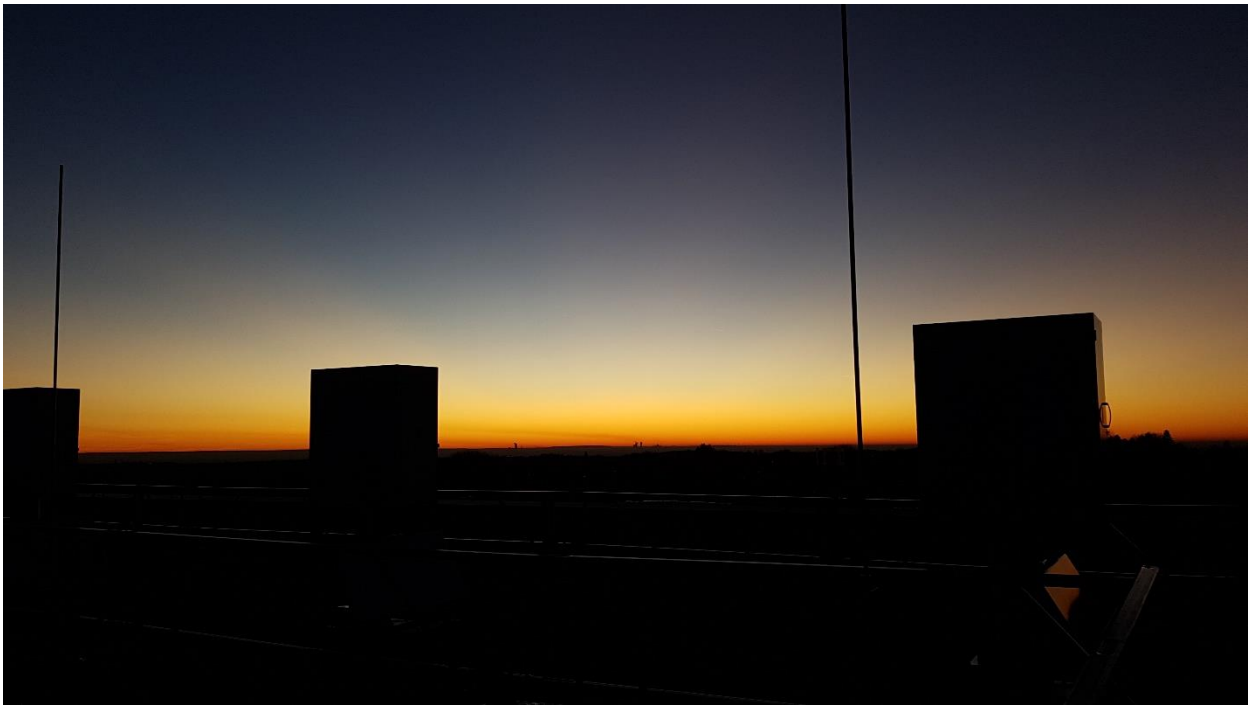


Abb 16: Sonnenuntergang am 30.12.2019, fotografiert an der Sternenwarte des CFG [BQ5]

Auswertung der Beobachtung und Analyse der Ergebnisse

Die erste Bildbearbeitung durch „Flat-“ und „Dark-“ Bilder

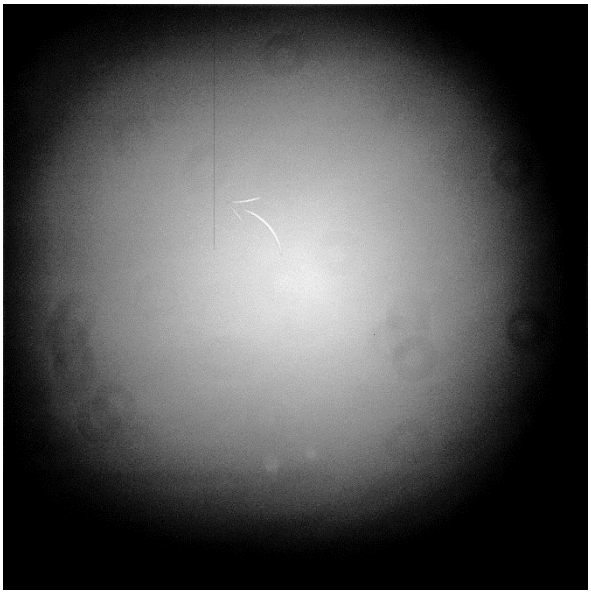


Abb 17: Ein Flatfield [BQ5]

Nachdem alle Aufnahmen ‚im Kasten‘ waren, ging es daran, diese auszuwerten. Dafür müssen die Bilder aber erstmal bereit gemacht werden, denn so wie sie aufgenommen wurden, enthalten sie noch einige Störfaktoren. Zum Beispiel den auf Seite 10 und 11 bereits angesprochenen Helligkeitsabfall zum Rand hin, oder ganz simpel Dreck auf der Linse oder dem Teleskop. Die Abbildung zeigt ein „LEDFlat“, bei dem der Kontrast erhöht und die Helligkeit verringert wurde. „LEDFlat“ bedeutet, dass das Bild nicht eine Aufnahme des Himmels, sondern die Aufnahme einer gleichmäßig beleuchteten ‚Lichtplatte‘ ist. Durch die Abbildung wird deutlich, weshalb die folgende Bearbeitung so wichtig ist, denn aufgenommen wurde eine saubere, gleichmäßig weiße Fläche. Im Bild fehlt davon jedoch jede Spur. Deutlich erkennbar ist zum einen, dass das Bild an den Ecken deutlich dunkler ist als in der Mitte und zum anderen viele kleine Kreise. Diese Kreise sind Staubkörner oder anderer Dreck, welcher sich im Teleskop verbirgt. Diese ‚Fehler‘ im Bild sind unumgänglich, jedoch auch recht einfach zu entfernen. Etwas schwieriger zu erkennen und deshalb mit einem Pfeil [BQ6] gekennzeichnet ist eine Reihe sogenannter „Toter Pixel“. Eine grade Linie, welche sich als schwarze Pixel durch das Bild zieht. An diese Stelle liegt ein technisches Problem der Kamera vor, welches nicht so einfach zu beheben ist, uns jedoch auch keine Probleme macht. Für die traditionelle Fotografie wäre so eine Reihe zwar schlimm, für uns ist sie jedoch recht egal, solange sie nicht den beobachteten Stern verdeckt.

Aufnahme der „Flat-“ und „Dark-“ Bilder

Abb 18: Ein Darkframe [BQ5]

Die Aufnahme der „Flatbilder“ (Flatfields) und „Darkbilder“ (Darkframes) war recht einfach. Für die LEDFlat wurde eine Lichtplatte auf das Teleskop gelegt und dann 20 Bilder zu je 5 Sekunden Belichtungszeit gemacht. Diese bilden dann alle Ungenauigkeiten im Bild ab, so dass diese Punkte dann später entfernt werden können. Für die Darkframes wurde bei Maxim DL Pro 5 [IL2], also dem Programm, mit welche die Aufnahmen angefertigt, die Einstellung ‚Dark‘ ausgewählt. Dadurch werden Bilder gemacht, die Blende der Kamera aber nicht geöffnet. Dadurch entsteht ein fast schwarzes Bild. Fast schwarz, da es das Rauschen der Kamera aufnimmt. Dieses ist auch auf den anderen Bildern abgebildet. Dadurch, dass die Kamera immer mit den gleichen Einstellungen aufnimmt, bleibt auch dieses Rauschen ebenfalls gleich und kann dann am Ende auch abgezogen werden. Die Abbildung zeigt eins der sogenannten „Darkframes“. Dabei ist die Anzeigeeinstellung so geändert, dass das Rauschen möglichst deutlich sichtbar ist.

„Masterflat“ und „Masterdark“ erstellen

Um die Darkframes und Flatfields verwenden zu können, muss zuerst ein „Masterflat“ beziehungsweise „Masterdark“ erstellt werden. Dabei werden alle aufgenommenen Bilder, in unserem Fall 15 bis 20, ‚gemittelt‘ also zusammengerechnet, um tatsächlich nur die Bildelemente zu behalten, die in allen vorhanden sind, also auch in den wirklichen Aufnahmen der Sterne. Auch dieser Vorgang wurde mit dem Programm Maxim Dl Pro 5 [IL2] durchgeführt. Diese Software ist zwar mit mehreren hundert Euro sehr teuer, bietet allerdings auch allerlei Möglichkeiten. Dass die Schule uns die Nutzung dieses Programms ermöglicht, erleichtert also vieles für uns im Projektkurs. Um die besagte Mittelung durchzuführen, muss man in dem Fenster „Set Calibration“ zuerst alle Bilder die gemittelt werden sollen, hinzufügen. In der Abbildung wurden durch Auswählen des Ordners ‚Dark‘ als „Source Folder“ die zuvor aufgenommenen Darkframes ausgewählt. Im mittleren Feld werden dann die Eigenschaften der Bildergruppen angezeigt, hier beispielsweise, die Belichtungszeit von 120,00 Sekunden oder die Auflösung. Im unteren Feld sind, nachdem die Bildergruppe angeklickt wurde die Dateinamen der einzelnen Bilder aufgelistet.

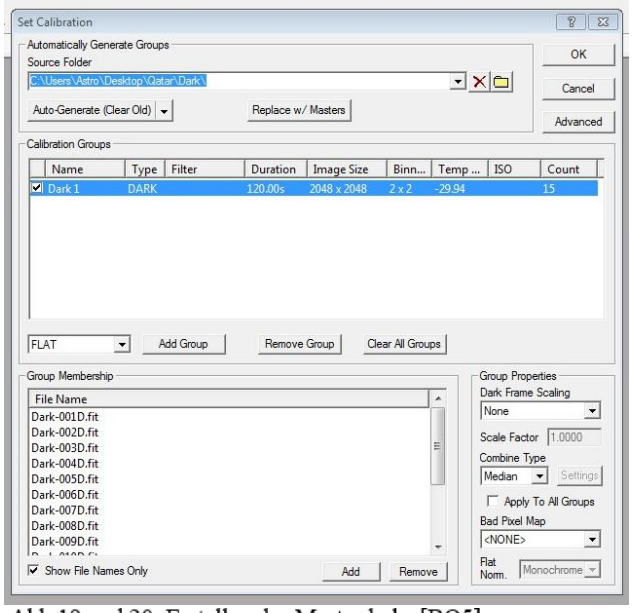
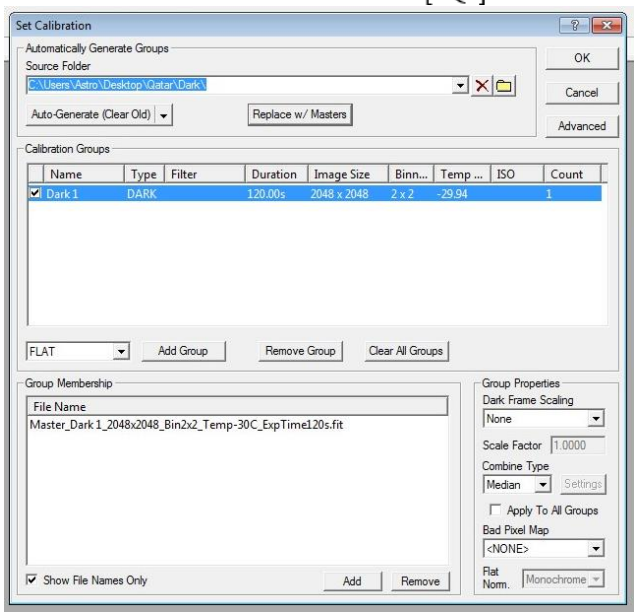


Abb 19 und 20: Erstellen des Masterdarks [BQ5]



Klickt man nun auf „Replace w/ Masters“ (das „w/“ steht für „with“) also „Mit Master ersetzen“, so werden, wie in der Abbildung darunter, die Ursprünglichen Bilder aus der Liste durch das Masterdark ersetzt. Dieses vereint jetzt die Bildelemente die in den 15 Ursprünglichen Bilder abgebildet waren. Der gleiche Vorgang wurde so auch für die LEDFlats ausgeführt. Dadurch erhielten wir dann aus insgesamt 35 Bildern ein Masterdark und ein Masterflat. Nun müssen diese noch von den Orginalbildern abgezogen werden.

Abzug der „Master“ von den Aufnahmen

Dies geschieht im gleichen Programm. In der nächsten Abbildung ist das dafür genutzte Fenster „Pixel Math“ abgebildet. In der Abbildung wurde beispielhaft ein Bild des Himmels („Qatar-5b-007R.fit“) und ein Dark („Dark-007D.fit“) eingesetzt. Die Buchstaben „R“ und „D“ stehen dafür, dass das erste Bild mit einem Rotfilter aufgenommen wurde und dass das Dark nunmal ein Dark ist. Im Feld „Operation“ ist bereits „Subtract“ ausgewählt. Wird dann in der oberen Ecke „Ok“ geklickt, beginnt das Programm mit der eigentlichen Arbeit, indem es die Bildelemente aus Bild B, welche auch in Bild A enthalten sind, dort entfernt.

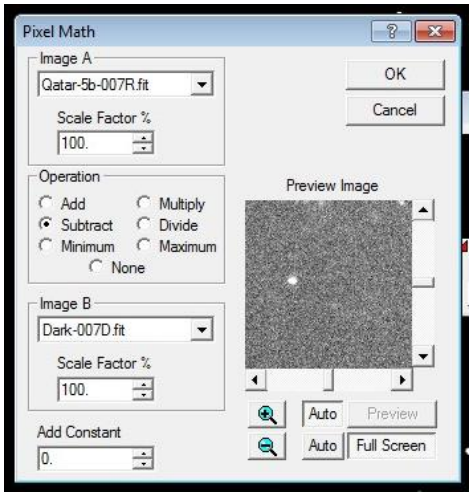


Abb 21: Abzug der Darkframes [BQ5]

Für die LEDFlats wird nicht „Subtract“, sondern „Divide“ ausgewählt, da in diesem Fall nicht das ganze Bild abgezogen werden soll, sondern nur die Helligkeit entsprechen geteilt wird. Natürlich werden trotzdem die zuvor erwähnten, im Bild enthaltenen Verunreinigungen entfernt. Der Unterschied der durch diese Bearbeitung entsteht ist beispielhaft in den Abbildungen 11 und 12 auf Seite 12 dargestellt.

Analyse der Bilder mit Muniwin

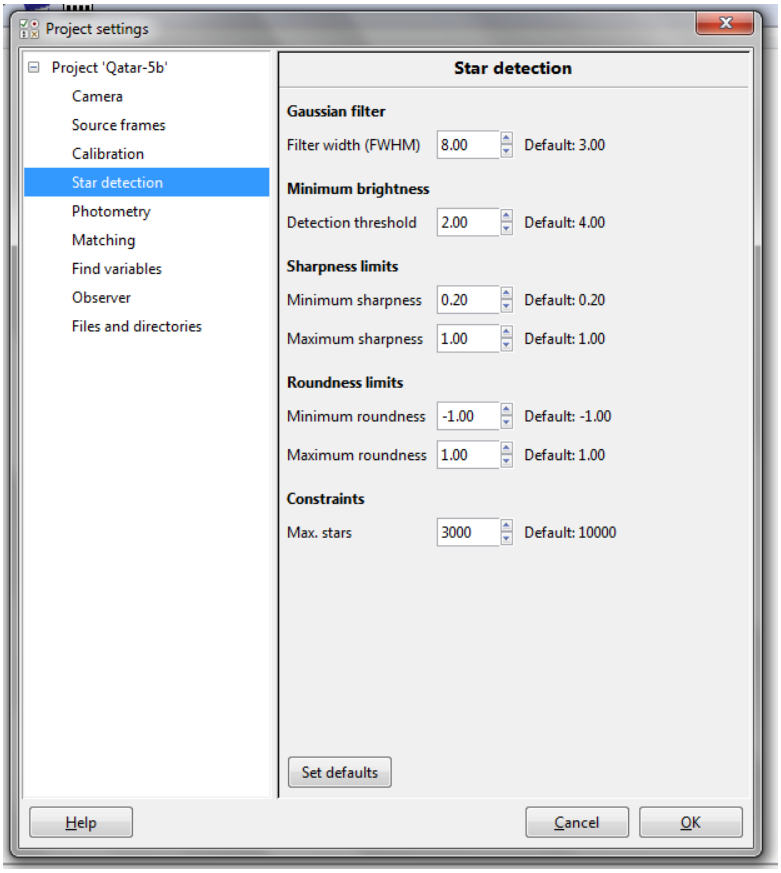
Was ist Muniwin?

Muniwin ist ein kostenloses Programm, welches sich jeder aus dem Internet herunterladen kann [IL3]. Dieses Programm kann auf einem Bild erkennen, wo Sterne sind und dann bei einer Reihe von Bildern, so wie in unseren Fall den 122 Bildern, welche bei der Aufnahme des Transits entstanden sind, automatisch die Position des erkannten Sterns im nächsten Bild zuordnen. Das ganze funktioniert natürlich mit weit mehr als einem Stern auf einmal. Dies ist nötig, da die Software, nachdem sie genügend Sterne erkannt hat, die Möglichkeit bietet, Sterne miteinander zu vergleichen. Dabei können dann mehrere Sterne ausgewählt werden, bei denen sich die Helligkeit nicht verändert hat und anhand derer sich die Änderung der Helligkeit eines bestimmten Sterns bestimmen lässt.

Analyse unserer Aufnahmen

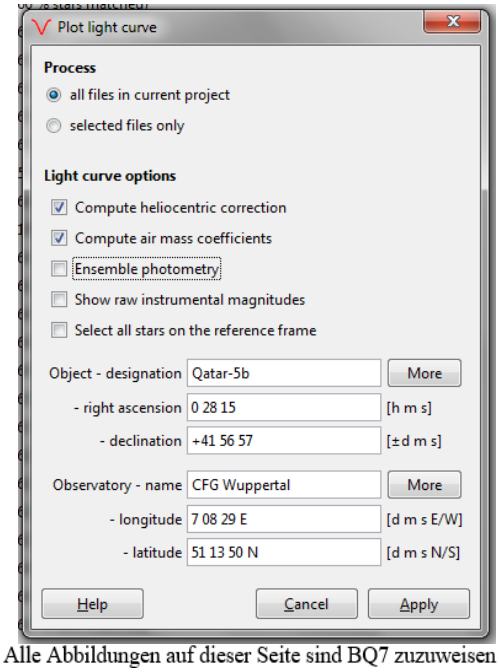
Um die Aufnahmen analysieren zu können, muss das Programm zuerst einmal wissen, um welche Bilder es geht. Um bei Muniwin eine neue Analyse zu starten muss zuerst ein neues ‚Projekt' erstellt werde. Um dies zu tun genügt ein Klick auf den Menüpunkt „Create a new project" . Nun kann ein Projektname sowie der Speicherort ausgewählt werden.

Der zweite Schritt ist dann das Hinzufügen der Bilder. Dies geschieht über den Menüpunkt „Add files from a folder (…)" . Dadurch öffnet sich die von Windows bekannte Ornerauswahl. Hier muss dann der gewünschte Ortner, welcher die Aufnahmen beinhalten geöffnet und dann auf „Add" geklickt werden. Damit sind alle Bilder zu Muniwin hinzugefügt.



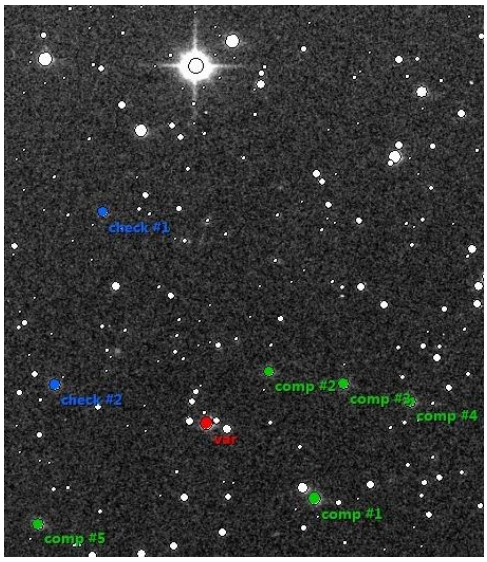
Danach haben wir die Grundeinstellungen für unser Projekt etwas verändert. Unter dem Punkt „Projekt settings" -> „Star detection" öffnet sich das in der Abbildung dargestellte Fenster. Dort werden die Parameter festgelegt, nach denen Muniwin nach Sternen sucht, beziehungsweise diese für weitere Analysen angibt. Bei uns wurde die Filterweite angepasst, sowie die nötige Helligkeit, damit ein Stern als solcher erkannt wird etwas verringert. Dies war nötig, um in unseren Aufnahmen alle Sterne aufzunehmen. Zusätzlich haben wir die maximale Anzahl an Sternen, welche auf den Bildern erkannt werden sollen auf 3000 begrenzt. Die Berechnung durch das Programm hätte sonst zu lange gedauert und es hätten auch Bildpunkt, die keine Sterne sind, erkannt werden können.

Wenn dann die Sterne gefunden und zugeordnet sind, in unserem Fall wurden auf den Bilder 3000 Sterne gefunden und meist 1800 bis 2000 zugeordnet, kann mit der Berechnung und Darstellung einer Lichtkurve begonnen werden. Dazu muss, nachdem „Plot light curve" ausgewählt wurde, die Auswahl getroffen werden, was bei der Berechnung der Lichtkurve berücksichtigt werden soll, sowie, welches Objekt beobachtet wurde und von wo die Beobachtung stattfand. Unsere Auswahl ist in der Abbildung dargestellt. Unser Objekt ist Qatar-5 b mit der Angabe der Position des Sterns Qatar-5 und beobachtet wurde von der Sternenwarte des CFG Wuppertal aus. Auch dazu ist die Position in Koordinaten angegeben.

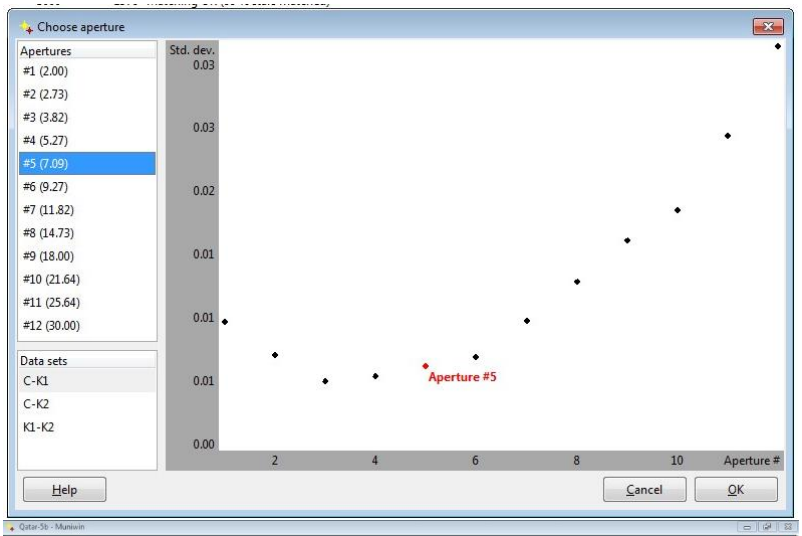


Alle Abbildungen auf dieser Seite sind BQ7 zuzuweisen

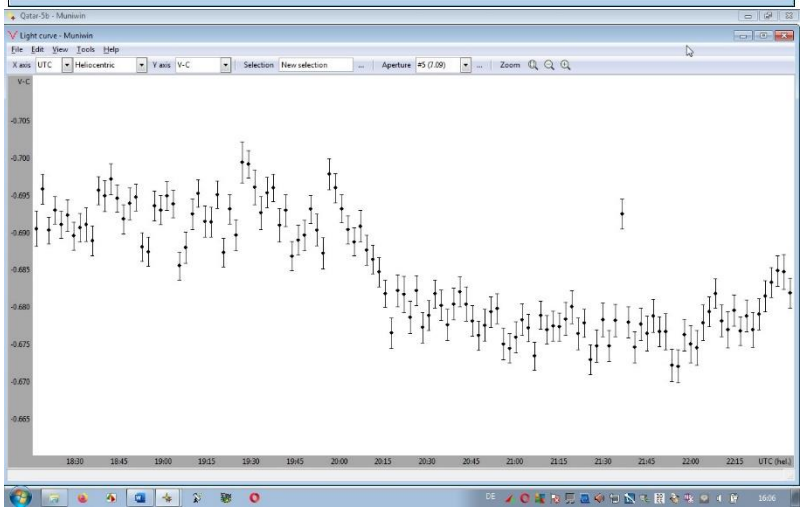
Nach klicken auf „Apply“ wird man nun dazu aufgefordert, die Sterne auszuwählen, die verglichen werden sollen. Dazu kann man, wie in der Abbildung zu erkennen, einen Stern als „Variable“ (Rot) setzen. Dieser ist dann der Stern, von welchen die Lichtkurve angegeben wird. Als nächsten können dann „Comparison“ (grün), also Vergleichssterne und „Check“ (blau) ausgewählt werden. Diese dienen dem Programm, wieder Name schon sagt, als Vergleich zum ausgewählten Stern. Dies ist nötig, da in den Bildern die Helligkeit des gesamten Bildes variieren kann, ohne dass sich tatsächlich die Helligkeit der Sterne ändert. Wählt man dann einen Vergleichsstern aus, dessen Helligkeit sich im Beobachtungszeitraum nicht geändert hat, so kann anhand dessen, die Schwankung der Helligkeit des beobachteten Sternes, unabhängig von Abweichungen durch die Aufnahmen bestimmt, werden.



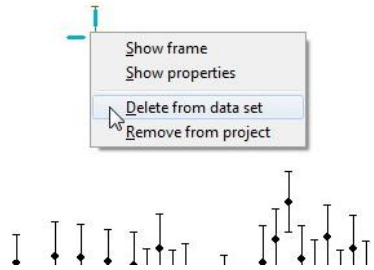
Wählt man nach dieser Auswahl erneut „OK“, muss man noch die „Aperture“, also Blende, auswählen. Durch die Auswahl der Blende ändert sich am Ende die Lichtkurve. Hier heißt es meist einfach ausprobieren, womit die besten Ergebnisse zu erzielen sind. In unseren Fall ist das, wie in der Abbildung zu sehen, die fünfte Auswahlmöglichkeit, 7,09.



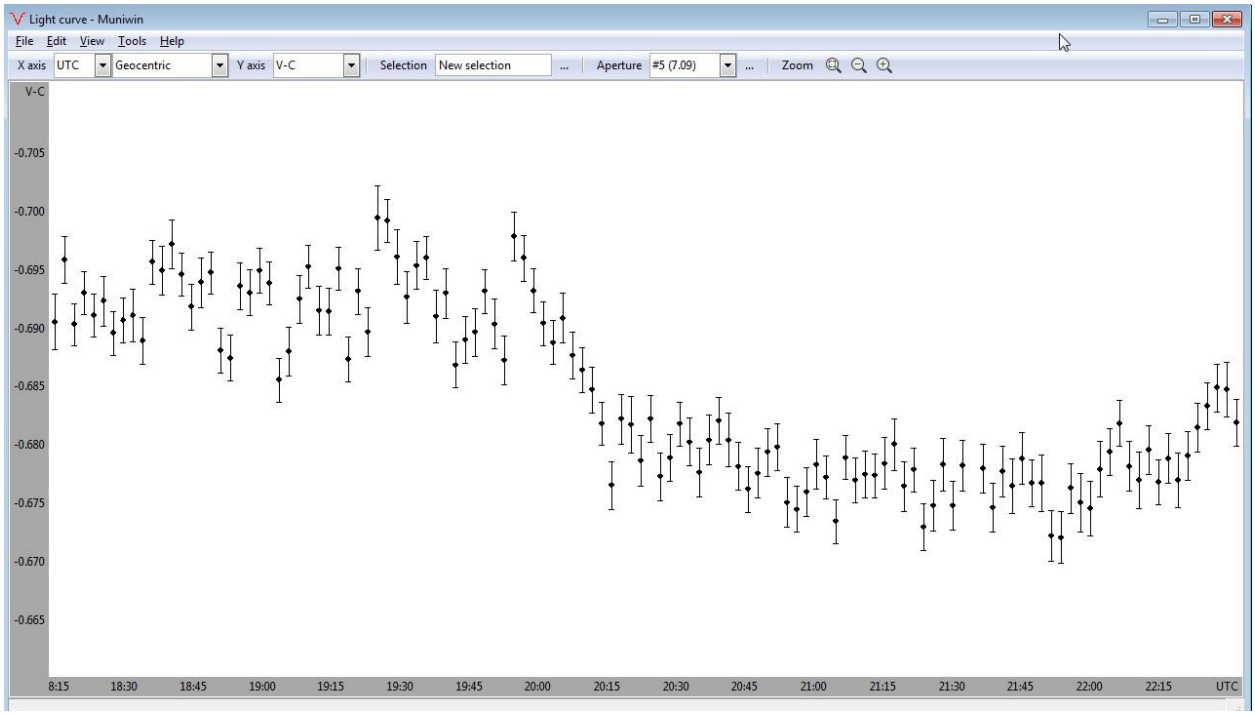
Mit der erneuten Auswahl von „OK“ bekommt man dann die Lichtkurve dargestellt. Unserer Beobachtung ist in der Abbildung zu sehen. Das dargestellte Ergebnis ist keine wirkliche Kurve, da nicht durchgehen die Helligkeit des Sterns gemessen werden konnte, sondern aufgrund der Belichtungszeit nur alle zwei Minuten (genauer alle 2 Minuten und 7 oder 8 Sekunden).



Bei diese Lichtkurve fällt eins direkt ins Auge. Das Frame #95 fällt wie in der Abbildung erkennbar absolut aus der Reihe. Das ist, grade bei einem einzelnen Frame, nur durch einen Fehler im Bild oder der Analyse des Programms zu erklären. Deshalb wurde dieses eine Bild wie in der nächsten Abbildung zu erkennen, aus dem Datensatz entfernt.



Alle Abbildungen auf dieser Seite sind BQ7 zuzuweisen



Diese Abbildung zeigt das Endresultat, die fertige Lichtkurve des Stern Qatar-5 während unserer Beobachtung am 30.12.2019.

Das Ergebnis

In der Abbildung ist der zeitliche Verlauf des Transits gut erkennbar. Zu Beginn der Beobachtung sind die Punkte, welche die Helligkeit des Sterns darstellen, zwar keine exakte Linie, verlaufen aber waagerecht. Dass keine Linie vorliegt ist unseren technischen Möglichkeiten geschuldet, da wir keine ganz exakten Messungen von so lichtschwachen Objekten vornehmen können. Gegen 20 Uhr UTC also 21 Uhr unserer Zeit, fällt die Menge des ankommenden Lichts. Dort beginnt der Planet sich vor den Stern zu schieben. Etwa gegen 22:20 UTC steigt die Menge des ankommenden Lichtes wieder, der Planet beginnt also sich aus unserer Sicht wieder zum Rand des Sterns zu bewegen. Da wir die Messung leider zu früh abgebrochen haben, ist das Ende des Transits nicht aufgezeichnet worden. Dazu mehr auf Seite 29.

Upload der Ergebnisse bei ETD-Exoplanet

Was ist ETD?

Die Internetseite „ETD - Exoplanet Transit Database“ [IL4], wie sie vollständig heißt, wurde von tschechischen Astronomen gegründet und bietet die Möglichkeit, eigene Beobachtungen von Exoplaneten hochzuladen, sowie sich die anderer (Hobby-)Astronomen anzuschauen. ETD steht hier für „Exoplanet Transit Database“, bezeichnet im allgemeinen Gebrauch jedoch meist "Estimated Time of Departure" was so viel heißt wie „Erwartete Ankunftszeit“. Diese ‚doppelte Bedeutung‘ ist kein Zufall. Denn eine Besonderheit diese Seite ist, dass für über 350 verschiedene Exoplaneten die nächsten, vom eingegebenen Ort aus beobachtbaren, Transits abgerufen werden können. Von sich selbst schreiben die erstelle der Seite, „ETD ist hier, um schnell und einfach eine Liste aller beobachteten Transite von Exoplaneten, für Beobachter und Forscher, zu liefern.“ [TQ7]

Ablauf des Uploads 1/5

Nachdem die Lichtkurve als ETD-Datei gespeichert war, konnte der Upload beginnen. Dazu klickt man auf der Internetseite [IL4] unter dem Banner auf „Model-fit your Data“ und gelangt zum in der Abbildung dargestellten Fenster. Dort muss dann der beobachtete Planet, in unserem Fall Qatar-5 b, und die Datei der Lichtkurve ausgewählt werden. Der Planet kann ganz einfach aus der implementierten Liste ausgewählt werden. Für die Auswahl der Datei genügt ein Klick auf „Durchsuchen“; dann öffnet sich das von Windows gewohnte Dateiauswahlfenster.

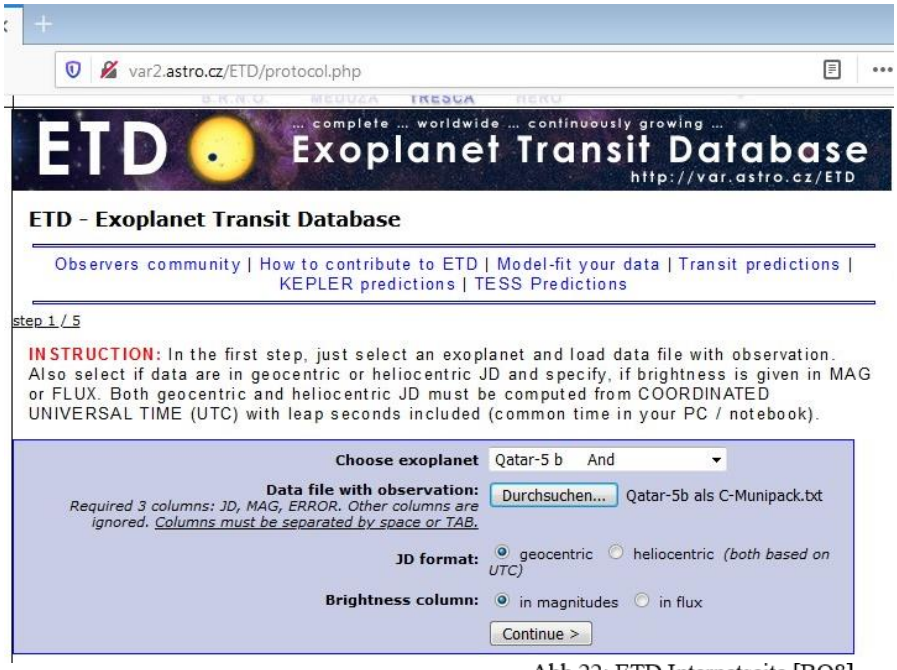
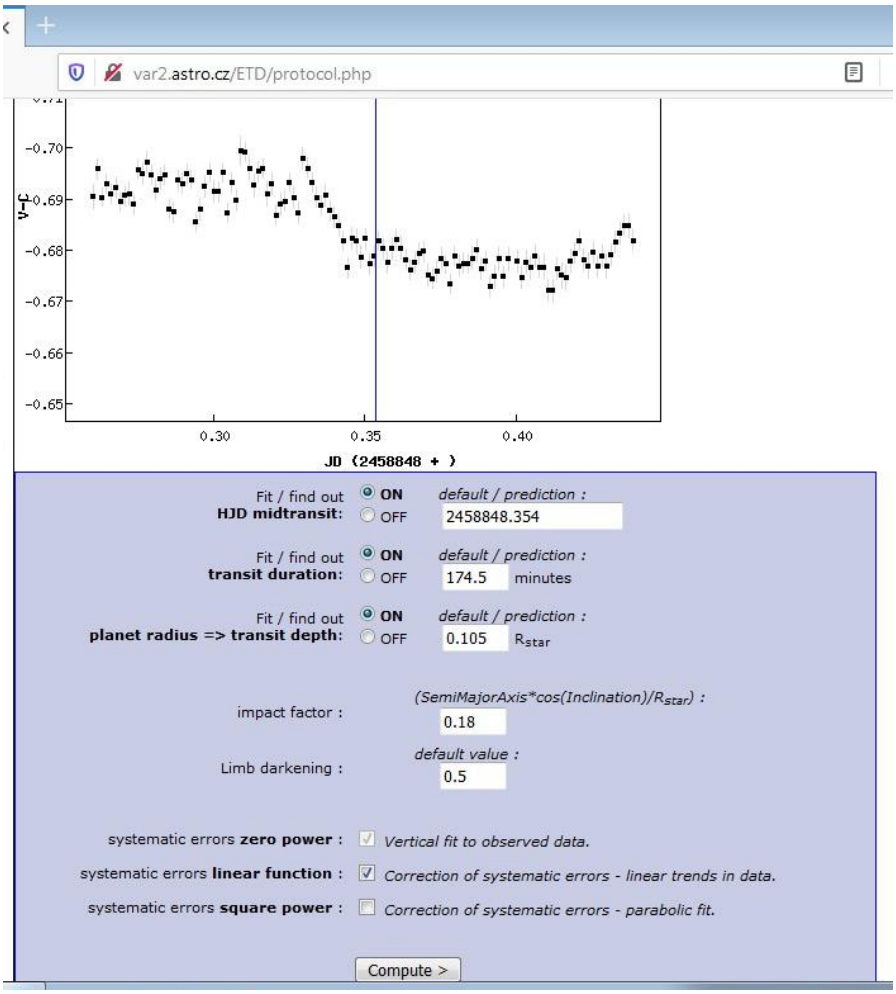


Abb 22: ETD Internetseite [BQ8]

Zusätzlich muss dann angeklickt werden, wie die Angaben berechnet wurden. In unserem Fall wie dargestellt, geozentrisch und in Magnituden. Wenn alle Daten eingegeben wurde, geht es mit einem Klick auf „Continue >“ weiter zu Schritt zwei.

Ablauf des Uploads 2/5

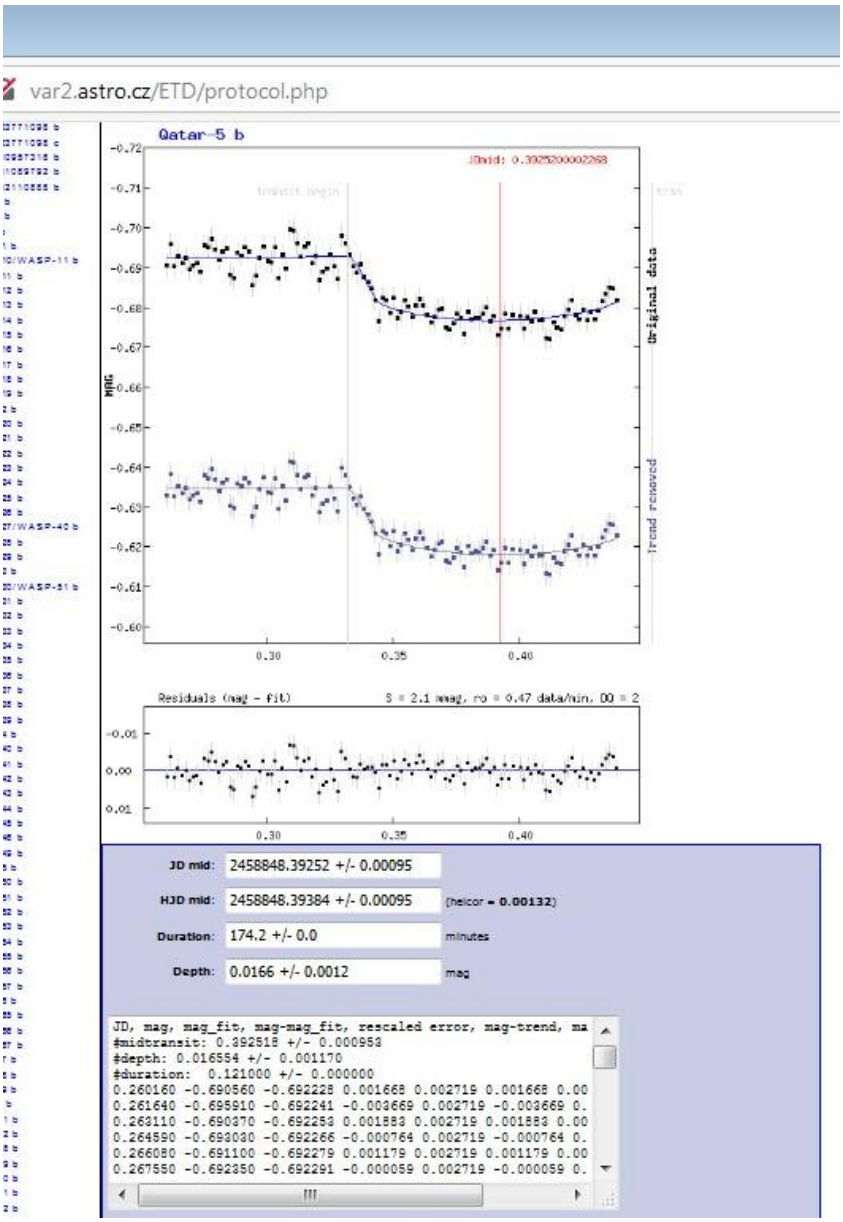


Wenn im ersten Schritt alle Daten richtig eingegeben wurde, wird man daraufhin zur in der Abbildung dargestellten Seite weitergeleitet. Dort ist im oberen Bereich die Lichtkurve dargestellt. Darunter einige Parameter, beispielsweise die Dauer des Transits, sowie die Mitte. Diese Daten sind schon eingetragen. Die eingetragenen Daten sind die Vorhersagen, welche anhand der anderen Beobachtungen dieses Planeten getätigt wurden. Man geht also davon aus, dass der Transit gleich beziehungsweise vorhersehbar abläuft. Ebenso werden auch die anderen Angaben auf diese Seite automatisch ausgefüllt. Also Planetenradius proportional zum Stern, die Randverdunkelung des Sterns sowie der Einfluss des Planeten auf die scheinbare Leuchtkraft des Sterns. Durch die unteren Kästchen kann dann noch ausgewählt werden, auf welche Art das Programm Messungenauigkeiten korrigieren soll. Auch diese Eingabe, beziehungsweise die Kontrolle der Werte, kann dann wieder mit „Continue >“ bestätigt werden und man wird zum nächsten Schritt weitergeleitet.

Alle Abbildungen auf dieser Seite sind BQ8 zuzuweisen

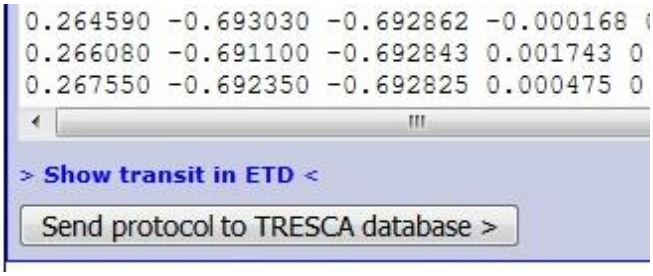
Ablauf des Uploads 3/5

Nach einer kurzen Berechnungszeit sieht man dann den in der Abbildung dargestellten Anblick auf dem Bildschirm. Dargestellt ist dort im oberen Block zweimal die Lichtkurve. Diesmal mit einer tatsächlich eingezeichneten Kurve. Die obere Kurve wurde dabei aus den eingegebenen Daten erstellt, die untere nach Abzug gewisser auftretenden Auffälligkeiten. Der rote Strich in der Mitte zeigt den Mittelpunkt des Transits nach den vorher akzeptierten ‚Standardwerten' an. Im mittleren Block ist die Abweichung der einzelnen Messungen zum Durchschnitt dargestellt, also die Messungenauigkeit. Darunter im blauen Kasten sind wieder einige Informationen angegeben, hier jetzt die errechnete Transitmitte sowie die Dauer und Tiefe. Tiefe bedeutet hier, wieviel Licht der Planet maximal verdeckt hat. Im Feld darunter ist erneut die Lichtkurve mit ihren Informationen als ‚Text' dargestellt.



Da der errechnete Mittelpunkt bei unserer Beobachtung nicht mit dem als Standard angegebenen übereinstimmte, wurde das Einsetzen des Standartwertes deaktiviert.

Um zu Schritt vier zu gelangen, genügt nach der Überprüfung der Daten ein Klick auf „Send protocol to TRESCA database".



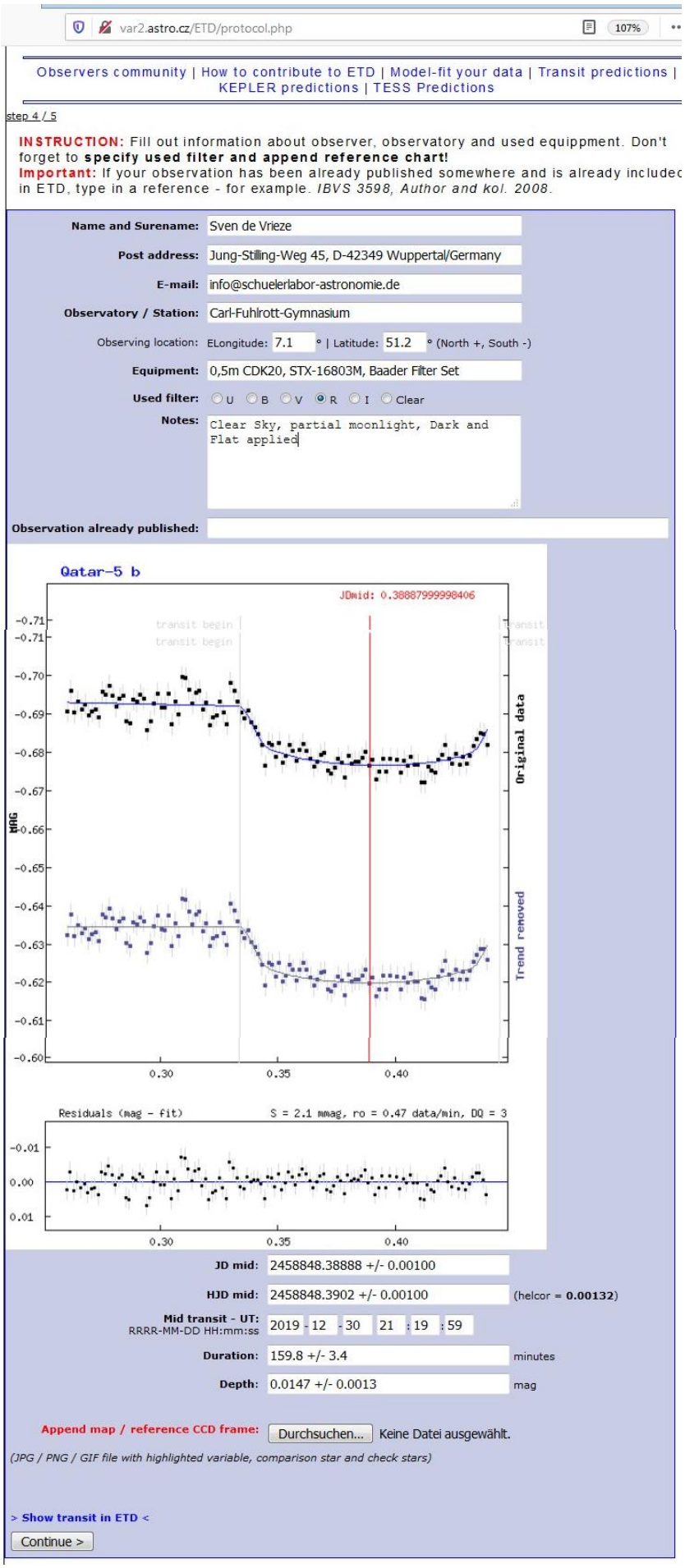
Alle Abbildungen auf dieser Seite sind BQ8 zuzuweisen

Ablauf des Uploads 4/5 und 5/5

Der vierte Schritt ist fast der einfachste. Das einzige, was eingegeben werden muss, sind die oben in der Abbildung erkennbaren Daten des Beobachters. In diesem Fall meine und die genutzte Hardware, also Teleskop, Filter und Kamera. Dazu können dann noch einige Infos frei hinzugefügt werden. Bei uns die Wetterlage und dass Darkframes und Flatfields angewendet wurden.

Darunter können dann alle bisherigen Eingaben erneut überprüft werden, denn, wie in der Abbildung zu erkennen, sind erneut die Darstellungen des letzten Schritts angezeigt.

Die letzte Information, die noch erbeten wird, kann ganz unten, ausgewählt werden; dort kann ein Bild angefügt werden. Dieses Bild sollte zeigen, welcher Stern beobachtet und welche als „Fixsterne“ also als Vergleichssterne, verwendet wurden. Das von mir verwendete Bild ist auf Seite 19 abgebildet. Klickt man dann unten auf „Continue >“ geht es weiter mit Schritt fünf. Dieser ist lediglich das erneute Überprüfen der Daten. Dabei wird also nichts neues eingegeben, es werden lediglich die Daten angezeigt, wie sie in Schritt vier eingegeben wurden. Wenn man diese erneut überprüft hat, kann der Upload über einen Klick auf „!Save protocol!“ abgeschlossen werden. (Die weitere Analyse des Ergebnisses ab Seite 26.)



Alle Abbildungen auf dieser Seite sind BQ8 zuzuweisen

Größenberechnung von Qatar-5 b

Nach der Auswertung unserer Aufnahmen ist es nun möglich, den Radius von Qatar-5 b, also dem aufgenommenen Planeten zu berechnen. Diese Berechnung wird im Folgenden erläutert und für Qatar-5 b mit unseren Messewerten durchgeführt.

Zum Verständnis der Formel muss erst einmal der Begriff „Flux“ erklärt werden. Flux ist die Bezeichnung für einen bestimmten Energiefluss, in unserem Fall Licht, da Licht ebenfalls eine Form der Energie ist. Im Term bezeichnet $F = \pi R^2 * I$ den Gesamtflux eines Himmelskörpers. Dabei steht R für den Radius des Himmelskörpers und I für die Intensität des dazugehörigen Muttersterns. Dieser Gesamtflux ist die gesamte Lichtmenge (Energie) die vom Himmelskörper verdeckt oder ausgestrahlt wird. Da ein Planet selbst nicht leuchten kann, ist es in unserem Fall die verdeckte Lichtmenge.

Der Lichtabfall beim Transit, also die Fluxdifferenz wird berechnet mit:

$$\Delta F = \frac{F_s - F_p}{F_s} = \frac{\pi {R_s}^2 I_s - (\pi {R_s}^2 I_s - \pi {R_p}^2 I_s)}{\pi {R_s}^2 I_s} = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$$

Dabei bezeichnen F_s und F_p den Licht, welches der Stern abgibt und dem, welches der Planet absorbiert. R_s und R_p stellen den Radius von Stern und Planet dar. Diese werden bei der Berechnung durch die, in der Astronomie üblichen Einheiten Sonnenradius und Jupiterradius getauscht, da so ein einfacherer Vergleich mit unserem Planetensystem möglich ist. I_s ist hier die Intensität des Sterns, also wie stark dieser strahlt. Diese Intensität wird als Energie pro Zeit und Fläche berechnet. Für den Planeten ist eine solche Angabe nicht möglich, da dieser das Licht nur absorbiert.

Unsere Messgröße, also die Differenz der scheinbaren Helligkeit (Δm), entspricht jedoch nicht der Fluxdifferenz, sondern:

$$\Delta m = -2{,}5 * \log\left(1 - \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2\right)$$

Um nun aus der obigen Formel den Radius des Planeten (R_p) zu berechnen muss der Term nach R_p umgeformt werden:

$$\Delta m = -2{,}5 * \log\left(1 - \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2\right) <=> \frac{-\Delta m}{2{,}5} = \log\left(1 - \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2\right) <=> 10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} = 1 - \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$$

$$<=> 10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} * {R_s}^2 = {R_s}^2 - {R_p}^2 <=> 10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} * {R_s}^2 - {R_s}^2 = -{R_p}^2$$

$$<=> {R_p}^2 = -10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} * {R_s}^2 + {R_s}^2 <=> {R_p}^2 = \left(-10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} + 1\right) * {R_s}^2$$

$$<=> R_p = \sqrt{-10^{\frac{-\Delta m}{2{,}5}} + 1} * R_s$$

Jetzt können unsere Werte für Δm und R_s eingesetzt werden. Für Δm wird der zuvor berechnete und unter anderem bei ETD angegebene Wert 0,0147 mag eingesetzt (Siehe Abbildung S. 23). Für R_s wird der Sternradius in km benötigt. Diesen zu messen ist mit unseren Möglichkeiten leider nicht machbar, deshalb wird hier der Wert, welcher bei exoplanets.org [IL5] verzeichnet ist, genutzt.

Der Radius des Sterns Qatar-5 ist dort als 1,128 Sonnenradien angegeben. Da wir, um den Wert in die Formel einzusetzen km brauchen, muss dieser Wert noch umgeformt werden. Da der Radius unserer Sonne, welcher hier als Einheit genutzt wird, etwas 696.342 km ist, wird dieser einfach mit 1,128 multipliziert:

R_s = 1,128 [R_{sonne}] = 1,128 * 696.342 [km] = 785.473,776 [km]

Wenn diese beiden Werte eingesetzt werden erhält man nun:

$R_p = \sqrt{-10^{\frac{-0,0147}{2,5}}} + 1 * 785473,776 = 86449,1$ [km]

Das ergibt also einen Planetenradius von etwa 86449 km für Qatar-5 b. Um dies in Jupiterradien umzurechnen muss das Ergebnis noch durch den Jupiterradius, welcher etwa 71492 km beträgt, geteilt werden:

$$R_p[R_j] = \frac{R_p[km]}{R_j[km]} = \frac{86449,1\ [km]}{71492\ [km]} = 1,209\ [R_j]$$

Der Radius von Qatar-5 b entspricht also nach unserer Messung 1,209 mal dem Radius des Jupiter. Dieses Ergebnis kann ungenau sein, da auch unsere Messungen nicht perfekt ausgefallen sind. Wie genau, beziehungsweise wie nah am Katalogwert diese Berechnung ist, wir auf den folgenden Seiten geklärt. [TQ8/TQ9]

Vergleich der Ergebnisse mit den Katalogwerten

Ein Vergleich mit den Katalogwerten, also den Werten, welche bei ersten Beobachtungen ermittelt und seit dem so als Parameter dieses Planeten gelten, ist auf verschiedene Arten und anhand verschiedener Gesichtspunkte möglich. Der erste Punkt, dem ich mich hier widme ist die ermittelte Größe.

Größenvergleich

Dazu stehen uns drei verschiedene Werte zur Verfügung. Der zuvor ‚per Hand' berechnete Wert, der von ETD berechnete Wert und die Angabe bei Exoplanet.org.

Also:

1. Von mir berechnet wurden 1,209 Jupiterradien. [Siehe S. 24 f.]

2. ETD gibt den Radius nach unseren Daten mit 1,107 Jupiterradien an.

In der Abbildung ganz oben bei R_p angegeben.

Show in ETD

R_p:	1.107 +/- 0.064 R_{Jup}	**1.218** $_{-0.055}^{+0.052}$ R_{Jup}
R*:	1.076 +/- 0.051 R_{Sun}	*fixed, errors included in i*
A:	0.04127 +/- 0.00067 AU	*fixed, errors included in i*
Per:	2.8792319 days	*fixed*
i :	88.74 +/- 0.87 °	**86.47** $_{-0.35\|1.21}^{+0.39\|1.77}$ °

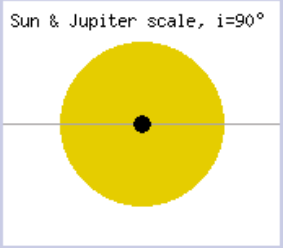


Abb 23: Planetenparameter von Qatar-5 b nach ETD [BQ9]

3. Auf exoplanets.org wird der Planetenradius mit 1,136 Jupiterradien angegeben.

Dieser Wert ist ebenfalls ganz oben in der Abbildung, unter „Planetary Radius [rjupiter]" abzulesen.

Transit Parameters	
Planetary Radius [rjupiter]	1.136 ± 0.056
Epoch of Transit Center	2457336.758242 ± 9.8×10^{-5}
Duration of Transit [day]	0.1212 ± 0.0015
Impact Parameter	0.18 ± 0.16
a/R*	8.27 ± 0.42
Transit Depth	0.01126 ± 0.00028
Planetary Density [g/cm^3]	3.95 ± 0.58
Surface Gravity	3.940 ± 0.046
Distance During Transit	*Unavailable*
RR	0.1061 ± 0.0013

Abb 24: Planetenparameter von Qatar-5 b nach exoplanets.org [BQ10]

Somit haben wir aus drei Quellen eine Angabe zum Radius von Qatar-5 b, wobei insgesamt eine Differenz von 0,102 Jupiterradien vorliegt. Das mag zwar wenig klingen, sind aber umgerechnet ganze 7292 km. Nun stellt sich die Frage, wie diese recht große Differenz zustande kommt.

Da für alle Berechnungen der gleiche Radius des Sterns verwendet wurde (1,076 Sonnenradien) [in Abbildung 23 unter R* erkennbar, für Exoplanets.org nicht in der Abbildung enthalte, jedoch auf der gleichen Seite aufgelistet. [IL5]] lässt sich dieser Faktor als Fehlerquelle ausschließen.

Die Differenz zwischen exoplanets.org und den anderen beiden Werten lässt sich unter anderem durch eine unterschiedliche Messung der Differenz der scheinbaren Helligkeit erklären. Diese Beträgt laut exoplanets.org 0,01126 mag, wurde von uns jedoch als 0,0147 mag gemessen und so auch in den beiden Rechnungen angewandt.

Dass bei der Rechnung, die ‚von Hand' ausgeführt wurde, trotzdem noch ein anderer Wert als bei ETD rauskommt, obwohl mit den gleichen Daten gearbeitet wurde ist wahrscheinlich auf Ungenauigkeiten bei Rechnen, fehlerhafte oder ungenaue Umrechnungen oder auf Korrekturen, welche von ETD vorgenommen wurden, zurückführen.

Nun stellt sich die Frage, welche dieser Angaben richtig ist. Diese Frage lässt sich nicht wirklich beantworten. Dadurch, dass der Planet so weit weg ist und wir ihn nur von der Erde aus beobachten können ist es unumgänglich, dass es zu Ungenauigkeiten bei der Messung kommt. Objekte hier auf der Erde können wir exakt vermessen, Objekte in den Tiefen des Alls jedoch nicht. Dabei sind wir immer von unseren technischen Möglichkeiten, aber auch von Störfaktoren wie beispielsweise der Atmosphäre begrenzt.

Vergleich mit vorherigen Messungen

Eine andere Möglichkeit unsere Werte mit Katalogwerten, beziehungsweise mit anderen Messungen zu vergleichen, bietet erneut die ETD Internetseite [IL6/IL7]. Dort gibt es zwei Möglichkeiten die von uns erstellte Messung mit den bisherigen zu Vergleichen.

Die erste befindet sich direkt unter der Tabelle in Abbildung 23. Dort befinden sich die beiden in der Abbildung gezeigten Darstellungen. Diese stellen den Stern Qatar-5 mit dem von uns beobachteten Planeten dar. Verglichen wird hier die berechnete Umlaufbahn des Planeten um den Stern. Die Höhe der Umlaufbahn wird dabei aus der Dauer des Transits errechnet. Da auch hier keine exakte Angabe möglich ist, wird, wie im unteren Teil der Abbildung, durch Erhöhung des Kontrasts besser erkennbar gemacht, eine Art Balken eingefügt. Dieser stellt die mögliche Abweichung dar. Hier wird erkennbar, dass unsere Messung nicht den Katalogwerten entspricht, also anders als bisherige Messungen ausfällt.

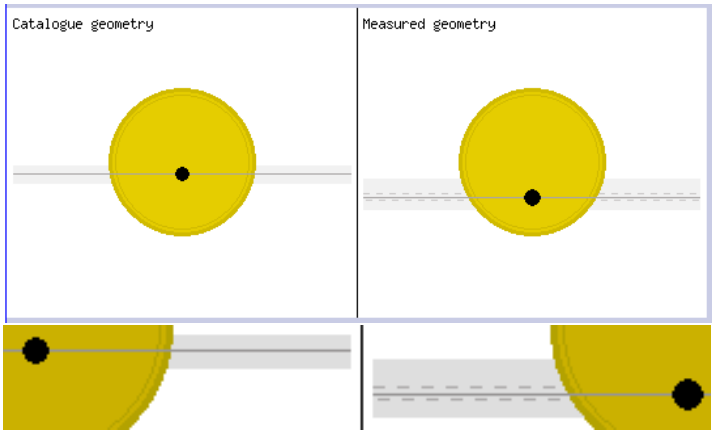


Abb 25: Bildliche Darstellung der Umlaufbahn [BQ9]

Dies ist an anderer Stelle auf der Internetseite noch besser zu erkennen. In der Abbildung ist der Vergleich aller auf ETD eingetragener Messewerte zu Qatar-5 b abgebildet. In den Grafiken steht jeder rote Punkt für eine Messung. Je größer der Punkt, desto besser ist die Qualität der Daten bewertet worden. Die für diese Projektarbeit durchgeführte Messung ist in alle drei Darstellungen der am weitesten rechts liegende Punkt. Die Anordnung der Punkte ist von links nach rechts nach Datum der Beobachtung geordnet. Die Graphen stellen von oben nach unten, den Unterschied des Transitbeginns, die unterschiedliche Dauer des Transits und die Variation in der scheinbaren Helligkeitsdifferenz dar. Hierbei ist zwischen allen Beobachtungen ein klarer Trend erkennbar. Denn die Transite des Planeten beginnen mit der Zeit immer etwas später als laut Katalogwerten angegeben und dauern etwas, wenn auch nicht sehr viel, weniger lange, sind dafür aber intensiver. Der Planet absorbiert also mehr Licht als der Katalogwert angibt.

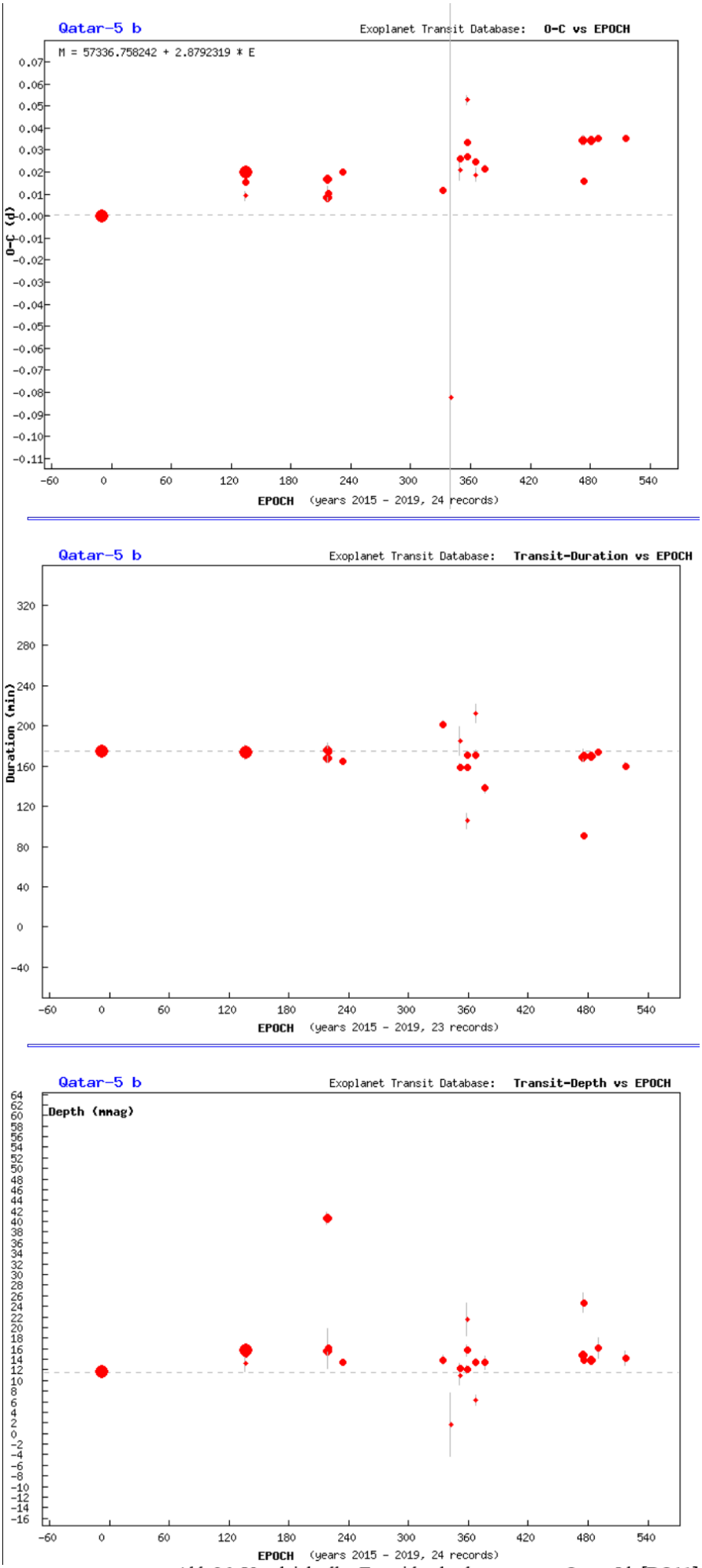


Abb 26: Vergleich aller Transitbeobachtungen von Qatar-5 b [BQ11]

Fehler unserer Messung

Da wir uns vor unserer Beobachtung diese Daten nicht angeschaut haben, ist bei der Beobachtung ein Fehler passiert. Denn, wie bereits mehrfach zu erkennen und auch in der Abbildung dargestellt, endet unsere Lichtkurve vor dem Ende des Transits. Das heißt, der in der Abbildung eingerahmte Bereich der Lichtkurve existiert nicht.

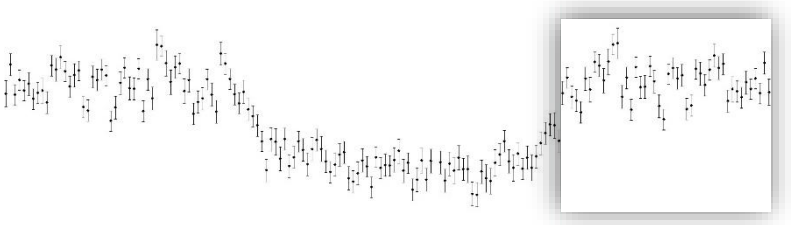


Abb 27: Bildmontage, zur Veranschaulichung wurde der Beginn des Transits gespiegelt und eingefügt. [BQ5]

Dieser Fehler ist dadurch entstanden, dass wir uns auf die Katalogwerte verlassen haben und somit auch die dort angegebene Start- und Endzeit des Transits nutzen, also anhand dieser ausrichteten, wie langen wir die Sterne aufnehmen. Durch die in Abbildung 26 erkennbare Verschiebung um etwa 45 bis 60 Minuten haben wir dann zwar noch aufgenommen, wie der Planet sich wieder zu Rand des Sterns bewegt und weniger Licht verdeckt, jedoch nicht, wie geplant das Ende des Transits welches als erneuter grader Verlauf der Lichtkurve erkennbar wäre. Optimalerweise hätte die Lichtkurve also wie Abbildung 27 ausgesehen.

Die anderen Änderungen im Verhalten des Planeten haben unsere Aufnahmen nicht beeinträchtigt, sind jedoch trotzdem interessant festzuhalten.

Literaturverzeichnis

TQ1 https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/physik-nobelpreis-exoplaneten-entdecker-und-pionier-der-kosmologie/

TQ2 https://www.welt.de/wissenschaft/article201613502/Physik-Nobelpreis-Mit-der-Entdeckung-von-Dimidium-fing-alles-an.html

TQ3 https://www.history.de/heute-vor/detail/erster-exoplanet-wird-entdeckt.html

TQ4 https://www.lichtmikroskop.net/optik/lichtspektrum.php

TQ5 https://www.nzz.ch/wissenschaft/der-erste-extrasolare-planet-spottete-allem-was-astronomen-zu-wissen-glaubten-ld.1514096

TQ6 https://astrokramkiste.de/exoplaneten-entdecken

TQ7 http://var2.astro.cz/ETD/ [Übersetzt von Sven de Vrieze]

TQ8 https://docplayer.org/19085115-Pascal-gimmler-und-jan-rutenkolk-18-03-2015.html

TQ9 http://exoplanets.org/detail/Qatar-5_b

Internetlinks

IL1 http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php?delka=7&submit=submit&sirka=51

IL2 https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/

IL3 https://sourceforge.net/projects/c-munipack/files/

IL4 http://var2.astro.cz/ETD/

IL5 http://exoplanets.org/detail/Qatar-5_b

IL6 http://var2.astro.cz/ETD/etd.php?STARNAME=Qatar-5&PLANET=b

IL7 http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1580311067

Bildverzeichnis

[Abbildung auf dem Deckblatt] Screenshot aus dem Programm „Stellarium“

BQ1 https://www.lichtmikroskop.net/optik/lichtspektrum.php

BQ2 https://astrokramkiste.de/exoplaneten-entdecken [Verweis auf Copyright am Ende der Seite]

BQ3 http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php?init=2019-12-29&till=2019-12-31&submit=Show&f=userdefined

BQ4 Screenshot aus dem Programm „Stellarium“

BQ5 Bild/Screenshot von Sven de Vrieze

BQ6 https://die-onlinehundeschule.de/aktion/pfeil-weiss/

BQ7 Screenshot aus dem Programm „Muniwin“ mit Daten und Aufnahmen von Sven de Vrieze

BQ8 http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php mit Daten von Sven de Vrieze

BQ9 http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1580311067

BQ10 http://exoplanets.org/detail/Qatar-5_b

BQ11 http://var2.astro.cz/ETD/etd.php?STARNAME=Qatar-5&PLANET=b

BQ12 https://www.eso.org/public/announcements/ann17041/

Abschlusserklärung

Hiermit erkläre ich, Sven de Vrieze, dass ich die vorliegende Projektarbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe und die Stellen der Projektarbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Projektarbeit in der schulinternen Bibliothek sowie im Astronomieraum verfügbar/vorhanden ist, sowie, dass sie auf der Internetseite der Sternenwarte einsehbar ist.

_____

Unterschrift Sven de Vrieze