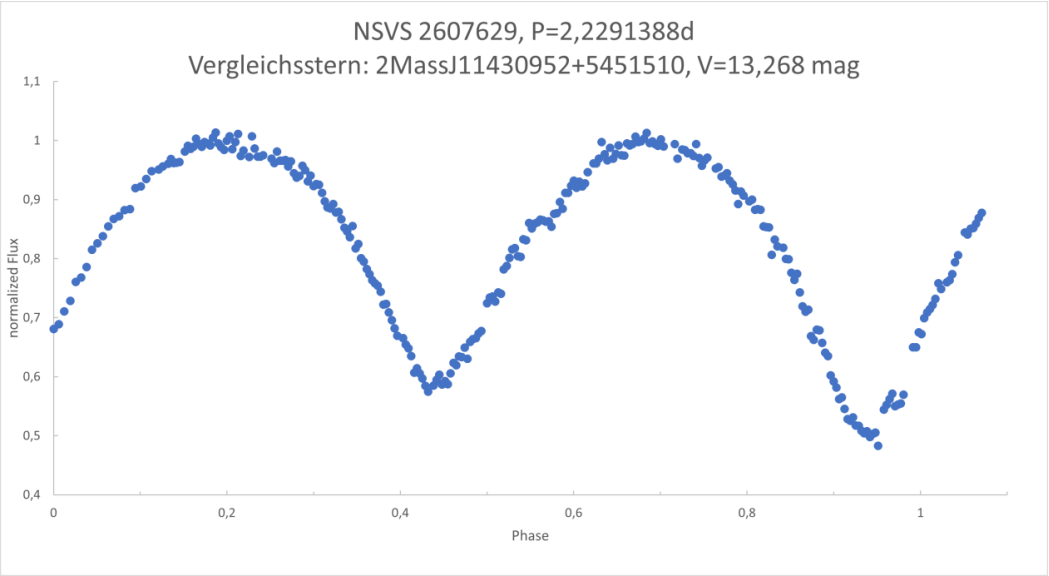
Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie 2020/2021
am Schülerlabor Astronomie des CFGs in Wuppertal

Photometrische Untersuchung des W-UMa-Doppelsternsystems NSVS 2607629



Noah Felix Baum

Carl-Fuhlrott-Gymnasium, 42349 Wuppertal

Jahrgangsstufe Q1

Kursleitung: Bernd Koch

Abgabedatum: 19.05.2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 2
2. Aufgabenstellung ... 3
3. Theoretische Grundlagen ... 4
3.1. Das Doppelsternsystem NSVS 2607629 ... 4
3.2. Doppelsterne ... 5
3.2.1. Beobachtungsmethoden von Doppelsternen ... 5
3.2.2. Photometrische Doppelsterne und ihre Lichtkurve ... 6
3.3. Die Roche Grenze ... 7
3.4. Das dritte Keplersche Gesetz ... 9
4. Das technische Equipment ... 12
4.1. Das Aufnahmeteleskop C14 Edge HD ... 12
4.2. Der 130/780 mm Refraktor Astro-Physics EDF-S als Nachführteleskop ... 14
4.3. Die Hauptkamera STF-8300M ... 15
4.4. Das Filterrad FW-8 ... 16
4.5 Die RGB-Filter ... 16
4.6. Die Nachführkamera Celestron NextImage Burst M ... 17
4.7. Die Autoguiding Software Spec Track ... 18
5. Experimenteller Aufbau ... 19
6. Durchführung der Beobachtung ... 21
7. Aufbereitung und Auswertung der Aufnahmen ... 23
7.1. Kalibrierung und Registrierung der Aufnahmen ... 23
7.2. Übertragung und Darstellung in Muniwin ... 24
7.3. Lichtkurvenerstellung mit Periodenberechnung ... 29
7.4. Berechnung weiterer Parameter ... 34
8. Bewertung der Ergebnisse ... 36
8.1 Vergleich der Ergebnisse mit Gürol und Michel ... 36
8.2. Vergleich der Lichtkurve mit Gürol und Michel ... 37
8.3. Fehlerdiskussion ... 39
9. Ausblick ... 40
10. Anhang ... 41
10.1. Abbildungsverzeichnis ... 41
10.2. Softwareverzeichnis ... 43
10.3. Danksagung ... 44
10.4. Abschlusserklärung ... 45

1. Einleitung

Astronaut zu werden ist schon seit dem Kindergarten mein Traumberuf. Durch die Faszination dieses Berufes bin ich später fast nur nebenbei auf die Astronomie gestoßen. Ich habe mir gerne und oft Bilder vom Mond, den Planeten oder Planetarischen Nebeln angeschaut und mir viele Fakten und interessante Beobachtungen angelesen. Irgendwann habe ich dann versucht selbst den Mond oder die Planeten, die zurzeit gerade passend am Himmel standen, mit einem eigenen kleinen Teleskop zu beobachten. Ich war so immer wieder von der wunderbaren Welt außerhalb unserer Erde fasziniert und beeindruckt. Nachdem ich auf das Carl-Fuhlrott-Gymnasium ging, war ich begeistert, als ich hörte, dass es eine Sternwarte auf dem Dach der Schule gibt. Darum habe ich mich auch entschlossen in der Oberstufe den Projektkurs Astronomie zu wählen, um so weitere Kenntnisse über den Kosmos zu erlangen und auch komplizierte Prozesse im Weltraum zu verstehen. Im Projektkurs rückte die Themenwahl näher und ich war hin und her gerissen, da ich mich nicht entscheiden konnte, welchem Themenbereich ich meine Projektarbeit widme. Letztendlich habe ich viele Artikeln aus verschiedenen Bereichen der Astronomie gelesen. Die Doppelsterne haben mich besonders fasziniert. Die Vorstellung, dass es zwei Sonnen am Himmel geben könnte, erscheint zu Beginn recht unheimlich und unglaublich. Dennoch ist diese Überlegung gar nicht so abwegig, da geschätzt mehr als die Hälfte aller Sterne im Universum Doppel- oder Mehrfachsysteme sind.[1] Auch wenn dieses Sternsystem, von der Erde aus gesehen, nur wie kleine weit entfernte Sterne aussehen, lassen sich doch einige interessante Eigenschaften und Phänomene mit verschiedenen Beobachtungsmethoden erschließen. Das Spannende ist aber, dass jedes System unterschiedlich ist und sich von jedem anderen unterscheidet, wodurch es scheinbar unendlich viele Kombinationen und Konstellationen gibt. Deswegen habe ich mich entschlossen, dass ich diese Arbeit dem Doppelstern NSVS 2607629 widme. Dieser Stern stand zum Zeitpunkt der Beobachtungsphase des Projektkurses günstig am Himmel und konnte in dem vorgegebenen Rahmen gut untersucht werden.

[1] https://www.astro.uni-jena.de/Teaching/Praktikum/pra2002/node155.html; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

2. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Lichtkurve des bedeckungsveränderlichen Doppelstern NSVS 2607629 zu erstellen und dadurch einige Parameter selbst zu messen bzw. zu errechnen. Es handelt sich um zwei Sterne, die umeinanderkreisen, da sie gravitativ aneinandergebunden sind. Da sie sich von der Erde aus gesehen gegenseitig verdecken, wenn sie sich umkreisen, kommt es zu Helligkeitsschwankungen.[2] Diese Schwankungen versuche ich zu messen. Dazu werde ich in einen Zeitraum von über fünf Stunden den Doppelstern fotografieren. Aus den Fotos lässt sich dann anhand einiger Verfahren die Helligkeit des jeweiligen Zeitpunktes bestimmen. Da die Helligkeit durch die Verdeckung schwankt, lassen sich alle Punkte in einem Diagramm in Form einer periodischen Kurve auftragen. Aus dieser Kurve kann man einerseits die scheinbare Helligkeit ablesen. Andererseits möchte ich die Periode der Kurve berechnen. Auf das Sternsystem bezogen bedeutet eine Periode eine komplette Umrundung der beiden Sterne umeinander. Aus der Periode werde ich zusätzlich mit einigen Formeln den Abstand der Sterne zueinander und die Masse des gesamten Systems in Sonnenmassen berechnen. Zum Abschluss versuche ich meine Ergebnisse auf ihre Qualität und Richtigkeit zu überprüfen. Dazu nehme ich mir die Ergebnisse von Profiastronomen vor und gleiche diese mit meinen eigenen ab. Abhängig von den Abweichungen überlege ich mir zum Schluss wie repräsentativ und vergleichbar meine gemessenen und berechneten Werte und meine erstellte Lichtkurve sind.

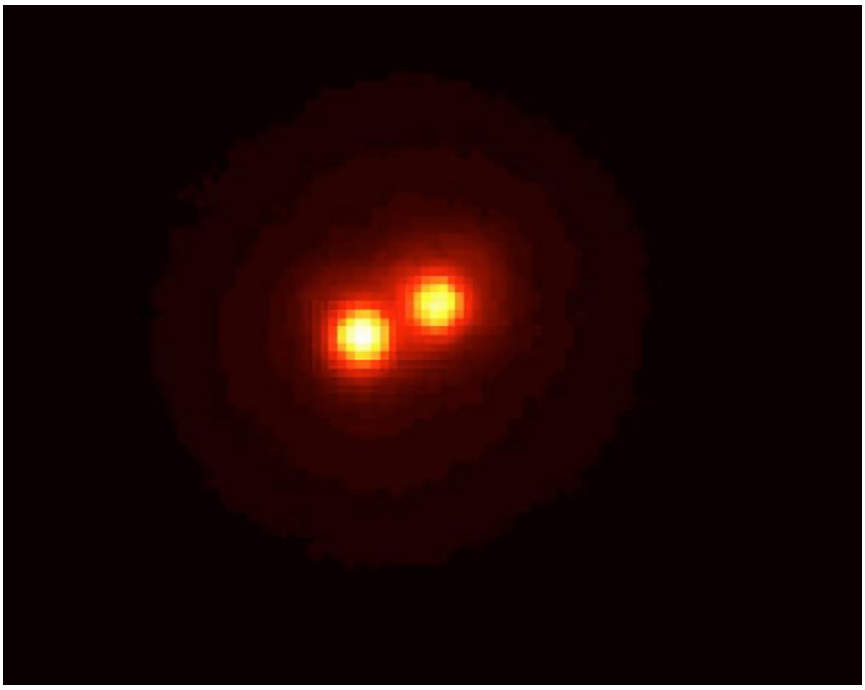


Abbildung 1: Der Doppelstern HIC 59206

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Das Doppelsternsystem NSVS 2607629

Der Doppelstern, der in dieser Arbeit untersucht wird, ist der photometrische und bedeckungsveränderliche NSVS 2607629. Er befindet sich im Sternbild Ursa Major (Abbildung 2) und ist zugleich ein Doppelstern der Art der W Ursae Majoris Sterne. Ein W Ursae Majoris Stern ist ein Doppelsternsystem, in welchem beide Sterne in engem Kontakt stehen. Dies bedeutet, dass die Atmosphären der Sterne sich berühren und gegebenenfalls Masse austauschen. Bei solchen Sternen liegt die Umlaufzeit zwischen 0,22 und 0,8 Tagen.[3] Der vorgestellte Doppelstern erfüllt diese Kriterien und wird demnach als W Ursae Majoris Stern bezeichnet. Seine Umlaufzeit P beträgt in etwa 0,229451 Tage, was etwa fünfeinhalb Stunden entspricht. Seine visuelle Helligkeit beträgt ungefähr 12,963 Magnituden (Je kleiner der Wert der Magnitude, desto heller ist der Stern).[4] Dabei ist natürlich zu beachten, dass die Gesamthelligkeit des Systems infolge der gegenseitigen Bedeckung periodisch schwankt. Für eine Beobachtung sind zudem noch seine Koordinaten wichtig:

Rektaszension 11h 42m 25,430s

Deklination +54° 52´ 48.90

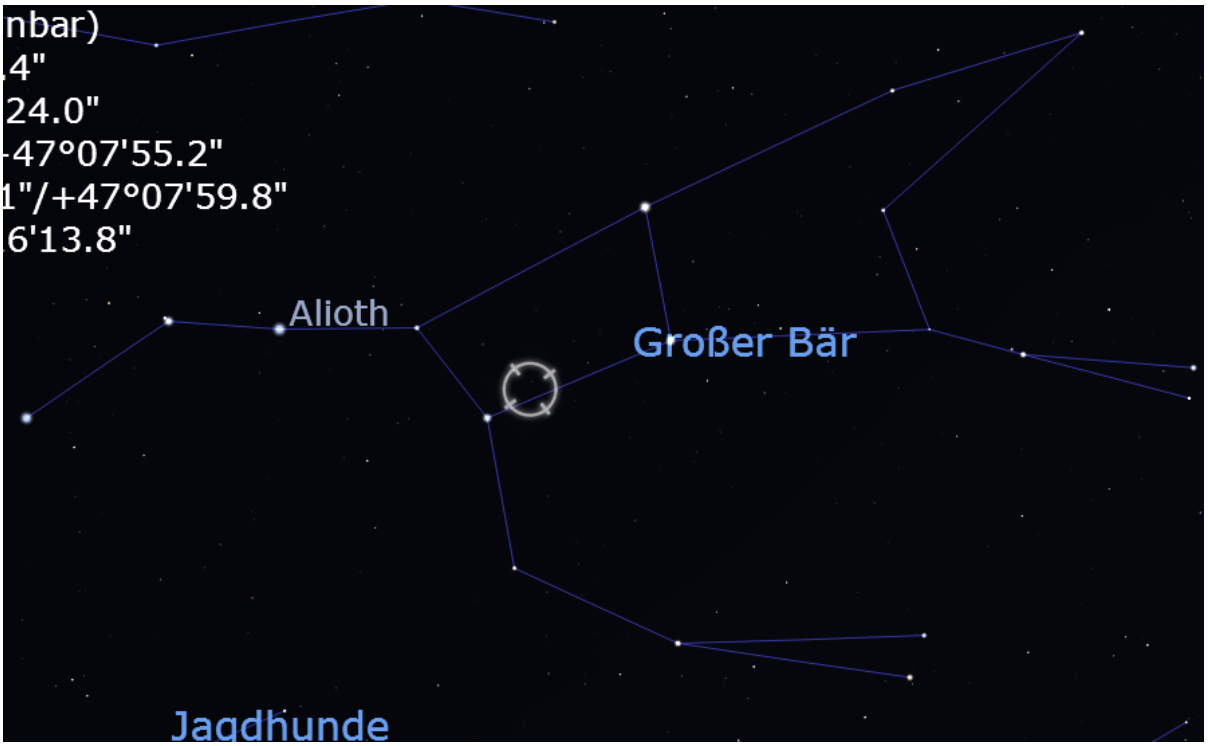


Abbildung 2: NSVS 2607629 im Sternbild Ursa Majoris

[3] https://de.wikipedia.org/wiki/W-Ursae-Majoris-Stern; zuletzt eingesehen am: 20.03.2021
[4] BVR photometric study of NSVS 2607629. A high mass-ratio W-type W UMa system - NASA/ADS (harvard.edu); zuletzt eingesehen am: 22.04.2021

3.2. Doppelsterne

3.2.1. Beobachtungsmethoden von Doppelsternen

Wenn zwei Sterne einen gemeinsamen Schwerpunkt haben und sich somit gegenseitig umkreisen, nennt man dies ein Doppelsternsystem. Sie sind gravitativ aneinandergebunden. Etwas mehr als die Hälfte aller bisher bekannten Sterne sind Teil eines Doppel- oder Mehrfachsystem. Mehrfachsysteme bedeutet, dass es nicht nur zwei Sterne geben muss, die durch die Gravitationskräfte zusammengehalten werden, sondern es durchaus auch drei, vier oder fünf Komponenten in einem Sternsystem geben kann.

Doppelsterne lassen mit der Hilfe von fünf verschiedenen Beobachtungsmethoden ausfindig machen. Zuerst einmal gibt es sogenannte Visuelle Doppelsterne, welche sich optisch voneinander trennen lassen. Teilweise können diese schon mit bloßem Auge beobachtet werden. Schon in der Antike war beispielsweise das System Mizar/Alkor im Sternbild des Großen Wagen ein elementarer Gegenstand zahlreicher Mythen, da schon damals bekannt war, dass beide Sterne so nah beieinander waren und doch räumlich zu trennen sind. Allerdings gibt es auch Visuelle Doppelsterne, die erst im Teleskop trennbar sind. In größeren Teleskopen lassen sich Doppelsterne bis etwa 0,1“ scheinbarer Distanz trennen. Doch selbst dann sind die Sterne manchmal noch viele hunderte Lichtjahre voneinander entfernt. Wenn man selbst im Teleskop die Sterne nicht mehr voneinander trennbar kann, dann bedient man sich anderer Methoden. So lässt sich auf einen Doppelstern schließen, wenn man sich die jeweilige Position des Hauptsterns anschaut und verfolgt. Bei periodischen Positionsänderungen relativ zu den Sternen im von der Erde aus gesehenem Umfeld, kann man mit recht hoher Sicherheit sagen, dass der Hauptstern noch einen Begleiter haben muss und es sich so um einen Doppelstern handeln muss. Diese nennt man dann Astrometrische Doppelsterne. Als weiteres Mittel um Doppelsterne aufzuspüren, kann man sich der Technik der Spektroskopie behelfen. Dabei wird sich ganz genau das Licht angeguckt, welches das jeweilige System aussendet. In so einem Farbspektrum ist ausschlaggebend die periodische Verschiebung der Spektrallinien infolge des Dopplereffektes. Mit diesem Verfahren kann sogar recht einfach die Radialgeschwindigkeit gemessen werden. Eine weitere und zudem eine recht unbekannte Methode beschäftigt sich mit Röntgen-Doppelsternen. Dieses System sind halbgetrennt mit mindestens einem Neutronenstern, welcher sich Materie seines Sternpartners einverleibt. Die Materie wird dabei stark beschleunigt, sodass sie Röntgenlicht aussendet, welches wir auf der Erde messen können. Die letzte Art von Doppelsternen sind Photometrische (bedeckungsveränderliche) Doppelsterne. Die Methode der Photometrie wird auch hier in dieser Arbeit angewendet. Diese Systeme verraten ihren Doppelsterncharakter durch ihren periodischen Wechsel der ausgesendeten Helligkeit. Die Beobachtungsebene fällt in die Bahnebene des Systems, wodurch beide Sterne sich hier von der Erde aus gesehen sich immer wieder in einer bestimmten Zeit verdecken, da sie eben durch ihre gravitative Gebundenheit umeinanderkreisen. Dieser Helligkeitswechsel lässt sich mit der Methode messen und anschließend in ein Diagramm auftragen. Die

daraus resultierende Lichtkurve geben Aufschluss auf die Leuchtkracht der Sterne und es lassen sich noch einige weitere Parameter mit ihrer Hilfe bestimmen.[5] [6] [7]

3.2.2. Photometrische Doppelsterne und ihre Lichtkurve

Bei Photometrischen Doppelsternen ist der Hauptbestandteil aller Annahmen und Berechnungen die Lichtkurve. Diese erhält man, indem der Doppelstern über die Dauer einer Periode durch eine Kamera fotografiert wird. Anschließend werden die generierten Aufnahmen mit verschiedenen Mitteln ausgewertet, sodass eine Lichtkurve entsteht. Diese Lichtkurve wird in einem Diagramm mit der vergangenen Zeit auf der x-Achse und der Helligkeit auf der y-Achse aufgetragen und ist eine periodische Kurve mit zwei Maxima und zwei Minima. Dabei ist die Art der Kurve und die Ausprägung der Extrempunkte abhängig von der Konstellation und Beschaffenheit des Doppelsterns. In der gegebenen beispielhaften Lichtkurve (Abbildung 3) lässt sich erkennen, dass aktuell beide Sterne nebeneinanderstehen. Logischerweise ist die Helligkeit dabei am höchsten, da auf der Erde zu diesem Zeitpunkt das meiste Licht ankommt. Drehen sich aber beide Sterne weiter umeinander, kommt irgendwann der Punkt, wo von der Erde aus gesehen ein Stern vor dem anderen steht (Abbildung 4). Dann unterdrückt der hellere Stern die vollständige Helligkeit des anderen Sterns. Daher ist die Helligkeit hier sehr gering und somit bei ihrem ersten Minimum. Gleichzeitig wird dieses Minimum auch als das Hauptminimum bezeichnet, da die Helligkeit so minimal wie möglich ist. Drehen sich beide Sterne weiter stehen beide Sterne erneut nebeneinander. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Helligkeit wieder maximal, da auf der Erde die Helligkeit beider Sterne ankommt. In der Regel sind die Maxima immer bei der gleichen Helligkeit, da die meisten Sterne überall gleich hell sind. Es kann aber vorkommen, dass Sterne auf der einen Seite heller sind auf der anderen. Ist dies der Fall, so ist ein Maximum heller als das andere, da die Sterne bei dem zweiten Maximum die Seite von sich zeigen, die beim ersten Maximum abgewandt war. Wenn sich die beiden Sterne

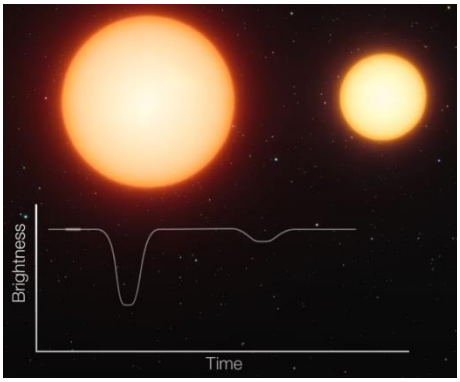


Abbildung 3: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Maximum

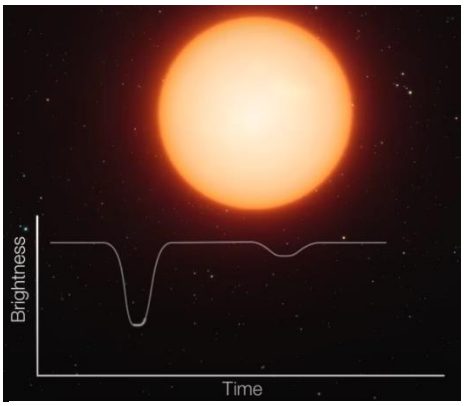


Abbildung 4: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Hauptminimum

[5] https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern; zuletzt eingesehen am 09.04.2021
[6] Dieter Beckmann, Astrophysik (2015), C. C. Buchner Verlag
[7] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/doppelsterne/3269; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

weiterdrehen, stellt sich der weniger hellere Stern (hier als kleinerer Stern dargestellt) vor den helleren Stern (Abbildung 5). So verdeckt der kleinere und leuchtärmere Stern ein Teil der Helligkeit des helleren Sterns, wodurch die Helligkeit wieder spürbar abnimmt. Dies ist das zweite Minimum, welches auch als Nebenminimum bezeichnet wird, da der Helligkeitsabfall nicht so stark ist, wie beim ersten Minimum. Anschließend drehen beide Sterne sich wieder in die Ausgangssituation und der Umlauf beginnt wieder von vorne. Um möglichst repräsentative Parameter des Doppelsterns aus der Lichtkurve zu ziehen und zu errechnen, ist es wichtig, dass eine komplette Periode in einer Nacht aufgezeichnet wird. Ansonsten müsste man eine weitere Nacht damit verbringen, in welcher man nicht genau weiß in welcher Phase sich das Doppelsternsystem befindet. Dennoch ist zu beachten, dass die dargestellte Lichtkurve nur modellhaft ist und jeder Doppelstern seine eigene Lichtkurve besitzt.[8] [9]

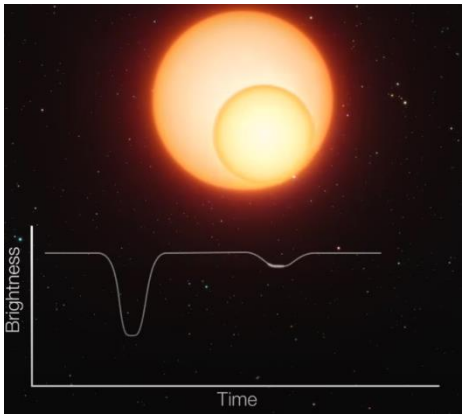


Abbildung 5: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Nebenminimum

3.3. Die Roche Grenze

Bei zwei Sternen, die sich umkreisen, da sie gravitativ aneinandergebunden sind, kann es vorkommen, dass sie gegenseitig Masse austauschen. Wenn dies geschieht, ist nicht die gesamte Masse des Körpers innerhalb der sogenannten Roche-Grenze. Diese dient als Beurteilung der Stabilität eines Himmelskörpers. Nimmt man beispielsweise einen Satelliten, der um einen Planeten kreist, so kreist dieser um den Planeten, da er von diesem gravitativ angezogen wird. Kommt der Satellit dem Planeten allerdings näher, so wird die Gravitation, die auf den Satelliten wirkt, durch die geringere Distanz größer. Gleichzeitig wird der Satellit durch eine innere Gravitation stabil zusammengehalten. Dabei verhält es sich ähnlich wie mit den Gezeitenkräften, welche die Roche-Grenze veranschaulichen. Ab einem gewissen Punkt verformt sich der Satellit, da die innere Stabilität nicht mehr größer ist als die Anziehungskraft des Planeten. Bei den Gezeiten verhält sich das Wasser in den Meeren auf der Erde gleich. Kommt der Mond näher an die Erde heran, so bewirkt die Gravitation des Mondes, dass das Wasser von ihm angezogen wird. Je näher ein Himmelsobjekt an die Roche-Grenze eines anderen herankommt, desto stärker verformt sich dieser Körper. Wenn der Satellit in die Roche-Grenze des Planeten eintritt, fängt er an sich aufzulösen. Teile, die sich näher am Planeten befinden, drehen sich schneller um diesen als Teile, welche etwas weiter vom Planten entfernt sind. Die innere Stabilität kann den Gezeitenkräften nicht mehr standhalten. Bei einem

[8] https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021
[9] Dieter Beckmann, Astrophysik (2015), C. C. Buchner Verlag

Doppelsternsystem, wo beide Sterne etwa ähnlich viel Masse besitzen, läuft die Annäherung an die Roche-Grenze auf eine andere Weise statt. Wenn die beiden Sterne so dicht umeinanderkreisen, dass sie teilweise die Roche-Grenze überschreiten, verformen sie sich und es bildet sich eine Verbindung der beiden Sterne. Dadurch kommt es zu einem Masseaustausch. Es wird hierbei von flüssigen Körpern gesprochen, da sie sich verformen. Beide Sterne wenden sich in einer Tropfenähnlichen Form dem Sternpartner zu. Bei Doppelsternen, die gegenseitig Masse austauschen muss aber zwischen zwei verschiedenen Arten differenziert werden. Einerseits gibt es Systeme, bei denen teils nur ein Stern die Roche-Grenze übertritt. Andererseits existieren Doppelsterne, die beide die Grenze überschreiten. Dieses System bilden oftmals sogar eine gemeinsame Hülle. Der Doppelstern NSVS 2607629 ist ein Kontaktsystem mit einer gemeinsamen Hülle und sieht damit in etwa so aus, wie in dem gezeigten dreidimensionalen Modell (Abbildung 6). Die Roche-Grenze eines flüssigen Körpers lässt sich mit einer mathematischen Formel berechnen. Dazu werden die Parameter R für den Radius des einen Körpers und r als Radius für den anderen Stern benötigt. Des Weiteren berücksichtigt die Formel die Dichten p_M und p_m der Himmelskörper. Die Roche-Grenze d lässt sich wie folgt berechnen:

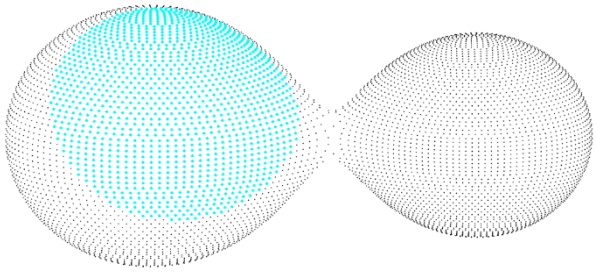


Abbildung 6: Das Kontaktsystem NSVS 2607629 im Modell; Grafik: Gürol und Michel

$$d \approx 2{,}423 * R * \sqrt[3]{\frac{p_M}{p_m}}$$

Hergeleitet wird diese Formel aus mehreren komplizierten Formeln, die ich hier nicht näher erläutern werde. Erstmals wurde die Formel der Roche-Grenze im Jahr 1850 von dem französischen Astronomen und Mathematiker Édouard Albert Roche hergeleitet und aufgestellt.[10] [11]

[10] Roche-Grenze – Wikipedia; zuletzt eingesehen am 30.04.2021
[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

3.4. Das dritte Keplersche Gesetz

Um die Gesamtmasse eins beliebigen Sternsystems anzugeben, wird das dritte Keplersche Gesetz angewendet. Wenn man die Umlaufzeit eines Planeten um seine Sonne und den Abstand der Himmelskörper zueinander kennt, kann die Gesamtmasse aus diesen zwei Faktoren berechnet werden. Alternativ kann auch die Dauer, die zwei Sterne benötigen, wenn sie in einem Doppelsternsystem umeinanderkreisen, als Umlaufzeit eingesetzt werden. So wurde es auch in dieser Arbeit getan. Die drei Keplerschen Gesetze formulierte Johannes Kepler am Anfang des 17. Jahrhunderts.[12] Sein drittes werde ich nun erklären und herleiten. Betrachtet man ein beliebiges Sonnensystem mit einer Sonne und einem Planeten, so kreisen beide Körper um ein gemeinsamen Schwerpunkt S. Dieser Schwerpunkt liegt in unserem Sonnensystem noch im inneren der Sonne, da kein Planet aus unserem Sonnensystem annähernd an die Gravitationskraft der Sonne herankommt. Dennoch liegt dieser Schwerpunkt nicht im Zentrum der Sonne. Der Abstand des Sonnenmittelpunktes zu dem Schwerpunkt wir mit r_s beschrieben. Der Abstand des Mittelpunktes des Planeten zu dem Schwerpunkt wir dementsprechend r_p genannt. Zusammen ergeben sie den Abstand r. Nach dem Schwerpunktsatz gilt daher:

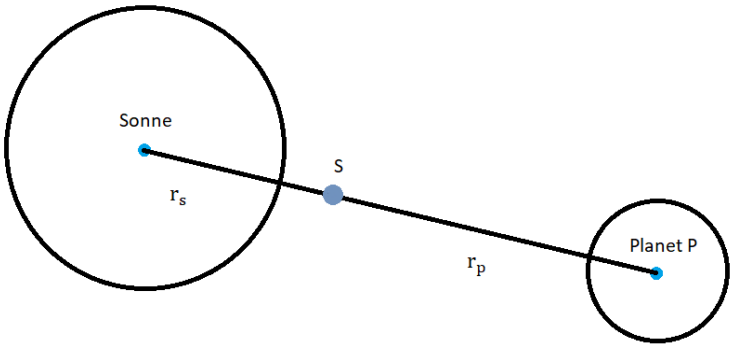


Abbildung 7: Sonne und Planet kreisen um einen gemeinsamen Schwerpunkt S

$$m_1 * r_p = m_2 * r_s$$

Da r sich aus r_s und r_p zusammensetzt, kann man diese Formel auch so zusammenfassen:

$$m_1 * r_p = m_2 * (r - r_p)$$

Daraus ergibt sich:

$$m_1 * r_p = m_2 * r - m_2 * r_p \quad |+m_2 * r_p$$

$$m_1 * r_p + m_2 * r_p = m_2 * r$$

Umgeformt folgt daraus:

$$(m_1 + m_2) * r_p = m_2 * r \quad |:(m_1 + m_2)$$

[12] Keplersche Gesetze – Wikipedia; zuletzt eingesehen am 24.04.2021

$$r_p = \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} * r$$

Diese umgestellte Formel für den Abstand des Planeten zum Schwerpunkt wird erst später benötigt. Der Planet läuft auf einer (Kreis-)Bahn um die Sonne mit dem Radius $\mathrm{r_p}$, weshalb die Formel der Zentripetalkraft zum Einsatz kommt:

$$F = \frac{m * v^2}{r_p}$$

Daraus ergibt sich zum einen Newtons Gravitationsgesetz. Zum anderen ergibt sich auch eine Formel für die Berechnung der Geschwindigkeit auf der Umlaufbahn.

$$F_G = \gamma * \frac{m_1 * m_2}{r^2}; \quad v = \frac{2 * \pi * r_p}{T}$$

Setzt man $\mathrm{F_G}$ gleich v^2 aus der Formel für die Zentripetalkraft, so erhält man:

$$\frac{m_1 * 4 * \pi^2}{T^2} * r_p = \gamma * \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

Nun kann für $\mathrm{r_p}$ die oben aus dem Schwerpunktsatz aufgelöste Formel eingesetzt werden:

$$\frac{m_1 * 4 * \pi^2}{T^2} * \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} * r = \gamma * \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

Da in der Formel im Zähler auf beiden Seiten die Massen $\mathrm{m_1}$ und $\mathrm{m_2}$ stehen, können diese gekürzt werden:

$$\frac{4 * \pi^2}{T^2} * \frac{1}{(m_1 + m_2)} * r = \gamma * \frac{1}{r^2} \quad | * T^2$$

$$\frac{4 * \pi^2}{(m_1 + m_2)} * r = \gamma * \frac{1}{r^2} \quad |: r$$

$$\frac{4 * \pi^2}{(m_1 + m_2)} = \gamma * \frac{T^2}{r^3} \quad |: \gamma$$

$$\boldsymbol{\frac{T^2}{r^3} = \frac{4 * \pi^2}{(m_1 + m_2) * \gamma}}$$

Das ist die Formel für die Berechnung einer Kreisbahn.[13] Nur hat man oft keine perfekte Kreisbahn in beliebigen Sternsystemen. Daher müssen noch ein paar weitere Faktoren in die Formel eingearbeitet werden, um auch eine elliptische Bahn beschreiben zu können. Einerseits muss die Exzentrizität e berücksichtigt werden. Des Weiteren wird durch E die exzentrische Anomalie der Bahn beachtet. Daher sieht die Formel folgendermaßen aus:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4 * \pi^2 * (1 - e * \cos E)^3}{(m_1 + m_2) * \gamma}$$

Da auf der rechten Seite der Formel bis auf die Massen der beiden Objekte alles konstante Faktoren sind, kann mit dieser Formel die Gesamtmasse zweier Objekte in Sonnenmassen berechnet werden. In unserem Sonnensystem kommt bei jedem Planeten ungefähr der Wert 1 für die Masse der Sonne und für die Masse des jeweiligen Planeten raus. Das liegt daran, dass die Massen der Planeten vernachlässigt werden können, da sie verschwindend gering sind im Vergleich zu der Masse der Sonne. Wenn man allerdings ein fremdes Doppelsternsystem betrachtet, kann man die Masse des gesamten Sternsystems berechnen, wenn man die Umlaufzeit und den Abstand kennt.

Die Keplerschen Gesetze wurden zwar, wie bereits erwähnt, erst von Kepler entdeckt. Dennoch hat sie Newton gegen Ende des 17. Jahrhundert umformuliert, da zu seiner Zeit die Physik schon weiter war und er die Grundlagen der klassischen Mechanik so einfließen lassen konnte. Im dritten Keplerschen Gesetz, mit welchem ich in dieser Arbeit die Gesamtmasse berechnen möchte, hat Newton ebenfalls mit seinen eigenen Gesetzten mitgewirkt.[14]

[13] http://www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.php/1308/Kepler-und-die-Doppelsterne.pdf; zuletzt eingesehen am: 24.04.2021

[14] Keplersche Gesetze – Wikipedia; zuletzt eingesehen am: 24.04.2021

4. Das technische Equipment

4.1. Das Aufnahmeteleskop C14 Edge HD

Aufgrund der Richtlinien der Covid-19 Pandemie im Februar 2021 konnten die Aufnahmen des Doppelsterns nicht am Schülerlabor Astronomie des CFGs stattfinden. Daher bot Herr Koch mir freundlicherweise an, die Aufnahmen an seiner Privatsternwarte im Westerwald stattfinden zu lassen. Das Hauptteleskop dieser Sternwarte war das C14 Edge HD. Es weist eine Öffnung von 14 Zoll auf. Die Brennweite beträgt 2700mm und ist durch einen Brennweitenverkürzer (Focal Reducer *0,7) verkürzt, wodurch die Lichtstärke erhöht wird. Dadurch ergibt sich ein größeres Bildfeld. Das Öffnungsverhältnis von f/7,6 kommt durch den Quotienten der Brennweite und der Öffnung zu Stande. Beides wird bei der Rechnung in Millimeter angegeben. Damit eignet es sich sowohl für Deep-Sky Objekte als auch für sehr lichtschwache Sterne, wie der Doppelstern NSVS 2607629.[15] Die Montierung, auf welcher das Teleskop befestigt war, ist die GM 2000 HPS von 10 Micron.

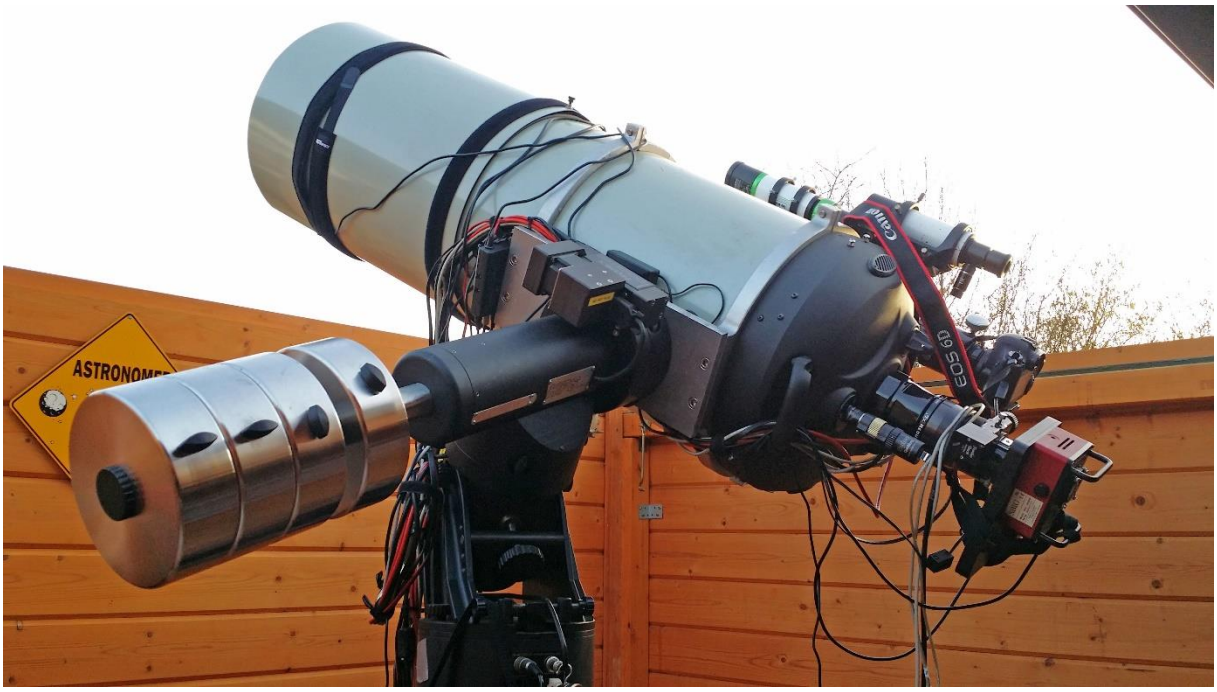


Abbildung 8: Das Hauptteleskop C14 Edge HD mit weiterem Equipment; Foto: Bernd Koch

[15] https://www.celestron.de/ce_de/edgehd-14-ota.html; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

Technische Daten zum C14 Edge HD [16]

Bauart	EdgeHD-Cassegrain
Öffnung	356mm
Brennweite	3810mm
Öffnungsverhältnis	f/10,8
Auflösungsvermögen	0,32 Bogensekunden
Lichtsammelvermögen	721 -fach einer 7mm Pupille
Tubusgewicht	21 kg

Das Teleskop ist ein Schmidt-Cassegrain Teleskop. Dies ist ein Spiegelteleskop mit einem konkaven Hauptspiegel und einem streuendem Zweitspiegel. Das einfallende Licht wird von dem Hauptspiegel gebündelt und zum Sekundärspiegel, dem Fangspiegel, weitergeleitet. Das Licht wird allerdings wieder in die Mitte des Hauptspiegels geworfen, wo der Spiegel unterbrochen ist, damit es zum hintenraus ragendem Okular gelangt und durch das Auge aufgenommen wird. Hierin besteht der Unterschied zum klassischem Newton Teleskop. Dabei würde das Licht vom Fangspiegel zur Seite hinausgeleitet werden.[17]

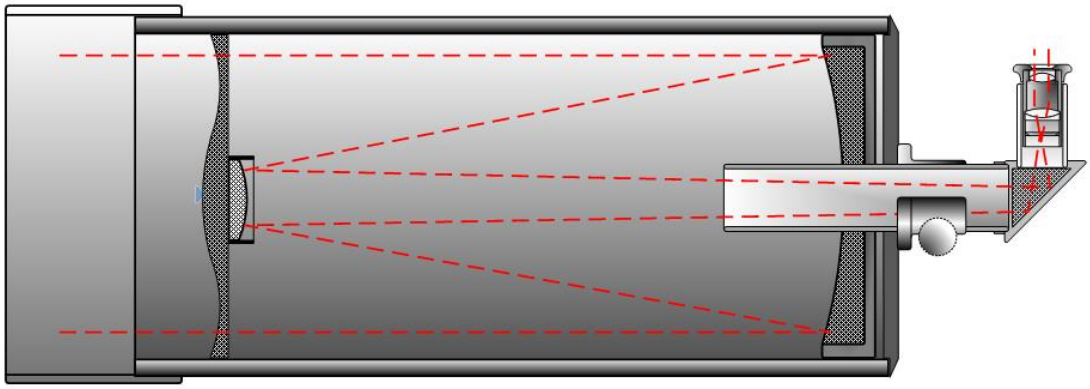


Abbildung 9: Skizze eines Schmidt-Cassegrain Teleskop im inneren des Tubus; Grafik: Szőcs Tamás Tamasflex

[16] https://www.astroshop.de/teleskope/celestron-schmidt-cassegrain-teleskop-sc-356-3910-edgehd-1400-ota/p,16403#tab_bar_1_select; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021
[17] https://de.wikipedia.org/wiki/Schmidt-Cassegrain-Teleskop; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

4.2. Der 130/780 mm Refraktor Astro-Physics EDF-S als Nachführteleskop

Die Nachführung der Montierung gleicht die Erdrotation zum größten Teil aus. Allerdings kann selbst die beste ausgerichtete Nachführung nie ganz genau das zu beobachtende Himmelsobjekt immer im Bildmittelpunkt halten. Um dennoch zu vermeiden, dass in meinem Fall der Doppelstern nach einer gewissen Zeit aus dem Bild verschwindet und man mit der Hand das Objekt erneut aufsuchen muss, wird ein Nachführteleskop verwendet. Dieses wird auf einen Stern gerichtet, der sich ebenfalls im Bildausschnitt des Objektes befindet. Die einzige Aufgabe dieses Teleskopes ist es, den anvisierten Stern immer möglichst auf der gleichen Stelle zu halten. Dieses Verfahren funktioniert zwar nicht ganz genau, erzielt aber bessere Ergebnisse, als wenn nur ein Teleskop verwendet würde. Als Nachführteleskop wurde der 130/780 mm Refraktor Astro-Physics EDF-S genutzt. Mit einer Öffnung von 130mm und einer Brennweite von 780mm kann dieses Teleskop gut als Guidingteleskop genutzt werden.

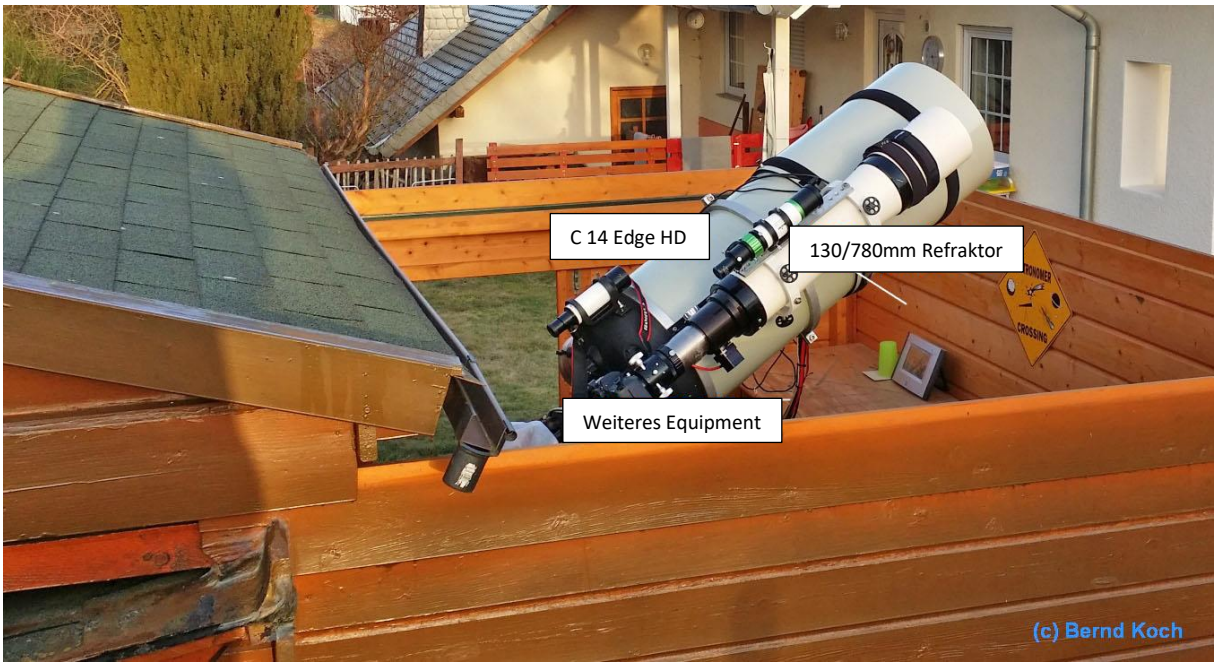


Abbildung 10: Der 130/780 Refraktor auf dem Rücken des C14 Edge HD; Foto: Bernd Koch

Technische Daten zum 130/780mm Refraktor[18]

Öffnung	130mm
Brennweite	780mm
Öffnungsverhältnis	f/6
Auflösungsvermögen	0,87 Bogensekunden
Gewicht	9,1 kg

[18] https://www.astro-physics.com/130gtx; zuletzt eingesehen am: 09.04.2021

4.3. Die Hauptkamera STF-8300M

Um das Bild aus dem Hauptteleskop, welches auf den Doppelstern gerichtet war, aufzunehmen, wurde die Kamera STF-8300M genutzt. Dies ist eine Kamera, welche extra für die Astrophotographie entwickelt und hergestellt wurde. Das „M“ im Namen steht für „Monochrome“. Das bedeutet, dass diese Kamera keine Farben erkennen kann, sondern die Bilder nur in Schwarz und Weiß aufgenommen werden können.[19] Für die Untersuchung des Doppelsterns war diese Tatsache allerdings nicht bedeutsam, da die Helligkeit der einzelnen Hauptfarben Rot, Grün und Blau mit einem Filterrad und dementsprechende Filtern ermittelt werden konnte.

Abbildung 11: Die Hauptkamera STF-8300M mit dem Filterrad FW-8 hinter dem C14 Edge HD; Foto: Bernd Koch

Technische Daten zur STF-8300M[20]

Sensortyp	CCD-Chip (Kodak KAF-8300)
Megapixel	8,3
Aktive Kühlung	Ja
Chipgröße	18mm * 13,5mm
Pixelgröße	5,4µm
Auflösung Foto	3326*2504 Pixel
Binning	2*2 Pixel
Gewicht	800 g

Die Kamera STF-8300M arbeitet mit einem CCD-Chip. Dieser Bildsensor setzt sich aus vielen einzelnen Fotodioden zusammen. Treffen Photonen auf den Sensor, werden durch die Fotodioden Elektronen freigesetzt, welche in einem Kondensator gesammelt werden. Wenn mehr Licht einfällt, ist dementsprechend auch die elektrische Ladung größer. Die Dioden sind alle miteinander verbunden und werden nach einem bestimmten Prinzip alle nacheinander

[19] http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm; zuletzt eingesehen am: 10.04.2021
[20] https://www.astroshop.de/astro-kameras/sbig-kamera-stf-8300m/p,47233#tab_bar_1_select; zuletzt eingesehen am: 10.04.2021

ausgewertet. Anschließend werden alle analogen Helligkeitswerte zu digitalen Daten umgewandelt, wodurch dann die Helligkeit eines Pixels bestimmt wird.[21]

4.4. Das Filterrad FW-8

Um von dem Doppelstern nicht nur die Helligkeit von allen sichtbaren Farben aus dem gesamten Farbspektrum gleichzeitig zu sehen, sondern auch gezielte Farbbereiche abdecken zu können, kam das Filterrad FW-8 zum Einsatz. Somit konnte ich das Sternsystem präzise auf bestimmte Farbbereiche untersuchen. Dazu wurde vor jeder Aufnahme durch das Filterrad ein Filter vor die Kamera gesetzt. Dies sollte immer abwechselnd geschehen.

Technische Daten zum Filterrad FW-8[22]

Optischer Weg (entsteht durch Filterrad)	20mm
Max. Filteranzahl	8
Filtergröße	36mm rund - ungefasst
Kabelnotwendigkeit	Nein - kann direkt an Kamera angeschlossen werden

4.5 Die RGB-Filter

In dem Filterrad befanden sich, wie bereits geschildert, drei Farbfilter. Es handelt sich hierbei um die RGB-C CCD-Filter von Baader. Wie die ersten drei Buchstaben schon verraten, kommen die Farben Rot, Grün und Blau zum Einsatz. Sie weisen eine hohe Transmission des jeweiligen Farbkanals auf (Abbildung 12). Im sichtbaren Bereich des Lichtspektrums lassen sie beinahe das gesamte Licht des jeweiligen Wellenlängenbereichs durch. Daher können diese Filter gut für die gezielte Untersuchung bestimmter Farbbereiche genutzt werden. Gleichzeitig mindern die Filter das Streulicht und auftretende Reflektionen.[23]

[21] Bildsensoren in Digitalkameras - PC-WELT (pcwelt.de); zuletzt eingesehen am 24.04.2021
[22] https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p7779_SBIG-FW8-8300-Filterrad---8x-36mm-ungefasste-Filter---fuer-ST-8300-und-4000.html; zuletzt eingesehen am 08.04.2021
[23] https://www.baader-planetarium.com/de/blog/die-baader-l-rgb-c-ccd-filter/; zuletzt eingesehen am 01.05.2021

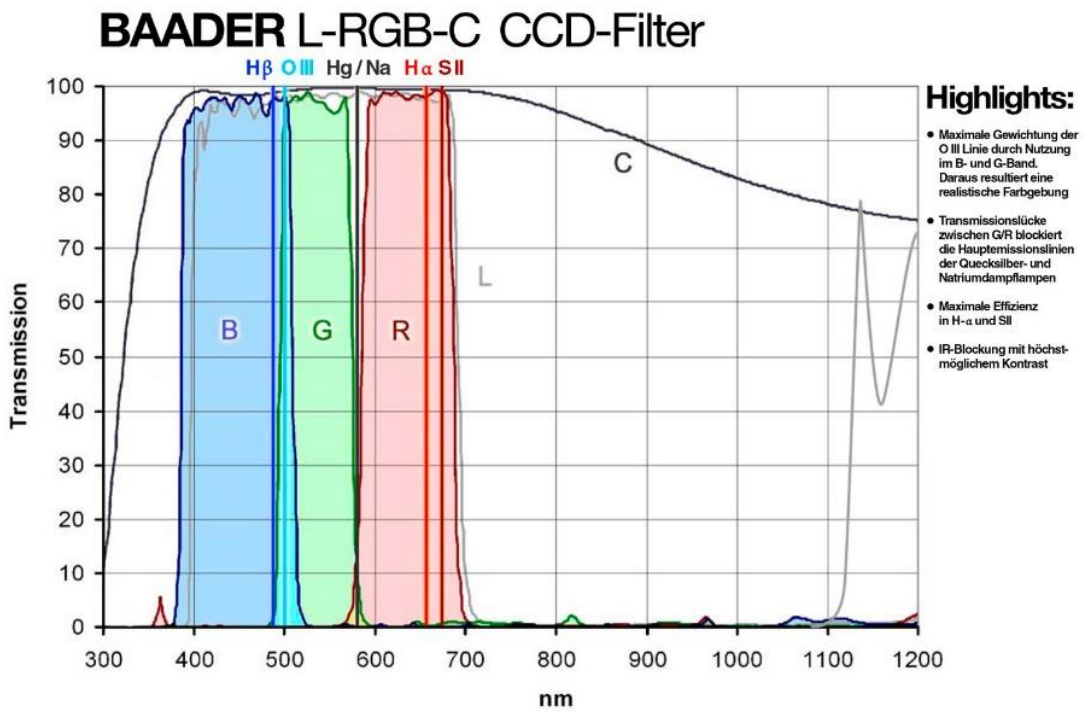


Abbildung 12: Transmissionskurven der Baader L-RGB-C CCD-Filter

4.6. Die Nachführkamera Celestron NextImage Burst M

An dem Nachführrefraktor wurde ebenfalls eine Kamera befestigt, damit das Bild auch digital am Computer bewegt werden kann. Hierzu wurde die Kamera NextImage Burst M von Celestron (Abbildung 13) genutzt. Dies ist genauso wie die Hauptkamera eine Monochrome Kamera, was ebenfalls am M im Namen erkannt werden kann. Dies stellt allerdings kein Problem dar, da sie als Guiding Kamera keine Farben benötigt. Zudem ist das schwarzweiße Bild viel empfindlicher gegenüber dem einfallenden Licht. Durch die kompakte und übersichtliche Bauweise ist sie recht schnell und einfach zu bedienen. Somit ist sie gut geeignet als Nachführkamera und kann gut den anvisierten Begleitstern im Blick halten.

Abbildung 13: Die Nachführkamera Celestron NextImage Burst M

Technische Daten der Celestron NextImage Burst M[24]

Sensortyp	CMOS-Chip
Megapixel	1,2
Chipgröße	4,8mm * 3,6mm
Pixelgröße	3,75µm
Auflösung Foto	1280 * 960 Pixel
Bilder pro Sekunde	120
Bit-Tiefe	12 Bit
Gewicht	57g

Die Kamera NextImage Burst M arbeitet mit einem CMOS-Chip als Bildsensor. Diese Sensoren arbeiten mit Farbfiltern und die Fotodioden werden durch ein Ausleseregister einzeln adressiert und ausgelesen. Im Gegensatz zu den CCD-Chips sind die COMOS-Chips günstiger und benötigen weniger Strom. Allerdings haben sie meistens eine geringere Lichtempfindlichkeit.[25]

4.7. Die Autoguiding Software Spec Track

Um das Teleskop, den Refraktor und die Kameras mit dem Computer zu verbinden, wurde die Software SpecTrack (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) benutzt. Diese macht eine möglichst genaue Nachführung anhand eines Begleitsterns möglich. Die Software hält den anvisierten Stern durch den Refraktor und die Nachführkamera immer recht genau in der Mitte und ermöglicht, sodass alle Aufnahmen über die fünf Stunden hinweg alle das ähnliche Bild aufwiesen und die Fehler der Montierung zum größten Teil ausgeglichen wurden. Zudem bietet das Programm ein zuverlässiges Guiding im Bereich der Spektroskopie an, welches bei meiner Beobachtung allerdings nicht erforderlich war.[26] Um die Software besser anhand von Bildern zu verstehen, können die Aufnahmen aus dem sechsten Kapitel „Durchführung der Beobachtung“ hinzugezogen werden.

[24] https://www.astroshop.de/astro-kameras/celestron-kamera-neximage-burst-monochrom/p,45277#tab_bar_1_select; zuletzt eigesehen am: 14.05.2021
[25] Bildsensoren in Digitalkameras - PC-WELT (pcwelt.de); zuletzt eingesehen am 24.04.2021
[26] https://www.baader-planetarium.com/de/spectrack-autoguiding-software-f%C3%BCr-sternspektroskopie.html; zuletzt eingesehen am: 15.05.2021

5. Experimenteller Aufbau

Den Aufbau der Teleskope und der Kameras mit Anschluss an den Computer hat Herr Koch freundlicherweise übernommen, da ich, wie bereits geschildert, aufgrund der Pandemie nicht physisch anwesend sein konnte. Auf den Rücken des Primärteleskopes wurde der 130/780mm Refraktor Astro-Physics EDF-S als Nachführteleskop befestigt, welcher mit der Celestron NextImage Burst M ausgestattet war. An das Hauptteleskop wurde das Filterrad und die Hauptkamera STF-8300M angeschlossen. Die Kameras und das Filterrad wurden anschließend mit dem Computer verbunden, sodass die Untersuchung auch außerhalb der Sternwarte stattfinden konnte. Der Aufbau sah in der Nacht visuell wie folgt aus:

Abbildung 14: Der experimentelle Aufbau am Tag

Um den Aufbau näher zu verstehen, können auch die Bilder aus dem vierten Kapitel „Das technische Equipment“ betrachtet werden, da sie den Aufbau aus anderen Perspektiven zeigen. Während der Messung nahm ich durch die interne Kamera der Sternwarte folgende Bilder des Aufbaus auf:

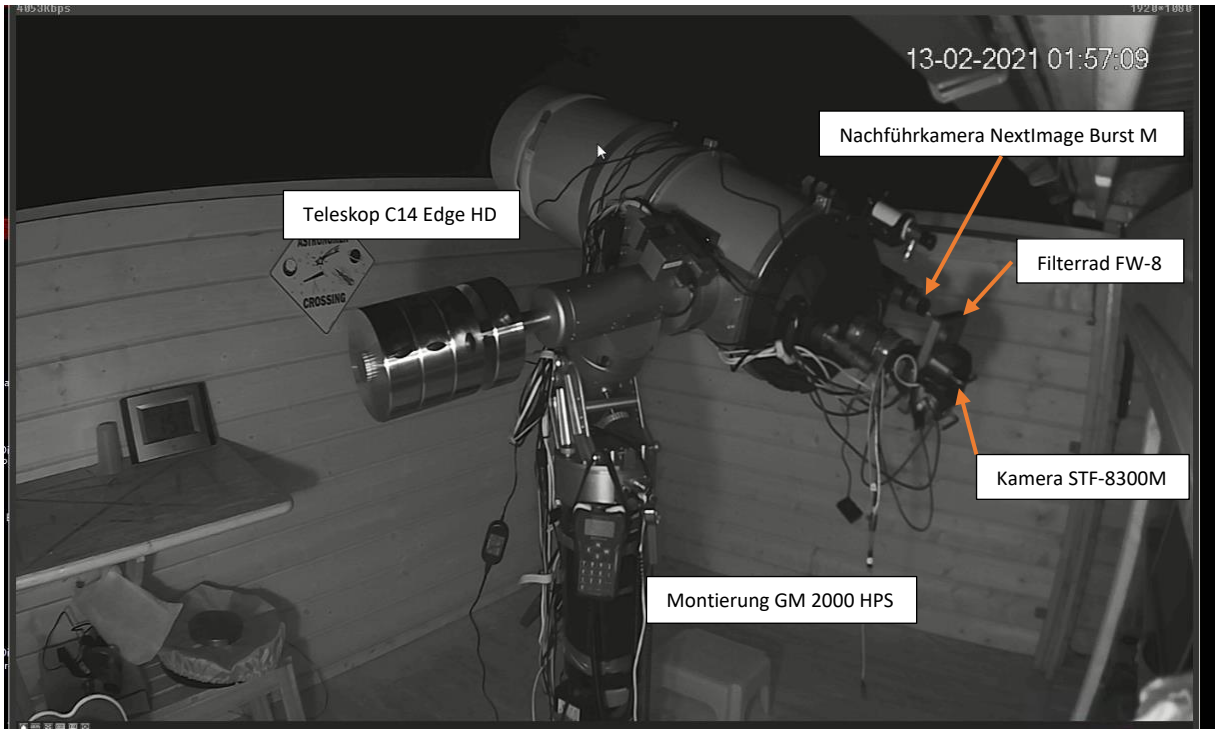


Abbildung 15: Der Aufbau in der Nacht in der Horizontalen

Abbildung 16: Der Aufbau in der Nacht in der Vertikalen

Da ich leider nicht vor Ort sein konnte, wurden die Messungen ferngesteuert durchgeführt. Dazu habe ich mir im Vorfeld die Software *AnyDesk* (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) installiert. Damit konnte ich auf den Bildschirm von Herrn Koch zugreifen und die einzelnen Schritte selbst durchführen. Da er vorher alle eingesetzten Geräte mit seinem Computer verbunden hatte, konnte das Experimentgut ferngesteuert durchgeführt werden.

6. Durchführung der Beobachtung

Die Beobachtung wurde in der Nacht vom 12.02.2021 auf den 13.02.2021 durchgeführt. Die Wetterbedingungen waren mit einem klaren Himmel gut. Die Außentemperatur betrug -8°C und es wehte ein eisiger Ostwind. Durch die recht kühle Temperatur konnte die Hauptkamera sich konstant auf vorher bestimmte -30°C kühlen, wodurch das Bildrauschen verringert wurde und die Bildqualität gestiegen ist. Die Ansteuerung an das Objekt wurde mit der Software *Stellarium* (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) durchgeführt. Dazu wurde die Montierung des Teleskopes mit dem Computer verbunden und in der Software wurde der Doppelstern anvisiert. Die Goto-Steuerung an der Montierung, auf welcher das Teleskop befestigt war, drehte das Teleskop zu der angegebenen Stelle. Da der Stern noch etwas versetzt war, habe ich das Teleskop mit dem digitalem Keypad (mittig unten in Abbildung 17) noch fein nachjustiert, sodass der Stern mittig im Bild war. Zum Schluss wurden beide Teleskope noch richtig fokussiert und scharfgestellt. Der Schirm zur Ansteuerung und Fokussierung sah folgendermaßen aus:

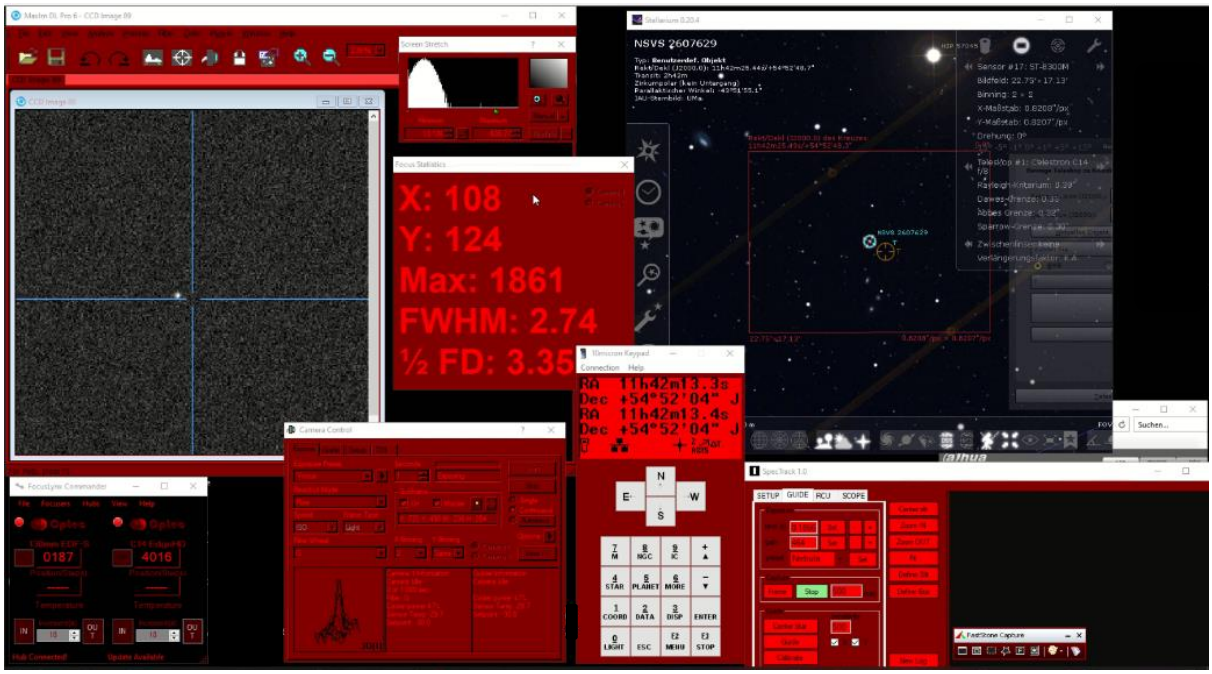


Abbildung 17: Schirm der Ansteuerung und Fokussierung

Der Aufnahmestart war um 19:52:38 Uhr (MEZ). Um die Bilder aufzunehmen, wurde die Software *MaxIm DL* (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) verwendet. Es sollte nach jedem Bild der Filter im Filterrad gewechselt werden, sodass von jedem Filter gleichviele Bilder in demselben Abstand aufgenommen werden. Die ersten sieben Bilder von allen Filtern wurden mit einer Belichtungszeit von 120 Sekunden aufgenommen. Danach habe ich die Belichtungszeit erst auf 90 Sekunden verringert und nach den nächsten drei Bildern wurden die restlichen Bilder

nur noch mit 60 Sekunden belichtet, damit die Bilder nicht überbelichtet werden. Die Aufnahme der Fotos wurden über den Schirm des Computers ferngesteuert.

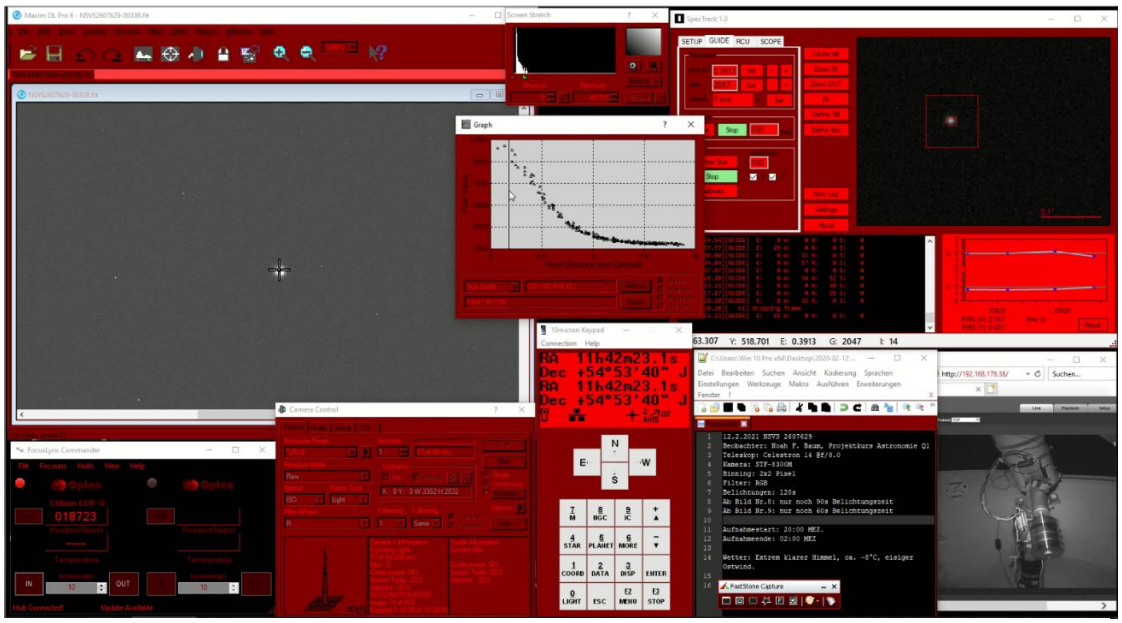


Abbildung 18: Aufnahme eines Bildes

Während der Nacht wurde der Wind immer stärker was zur Folge hatte, dass einige Bilder leicht verschwommen waren. Diese wurden hinterher aussortiert. Die letzte Aufnahme war um 01:45:56 Uhr (MEZ) beendet. Insgesamt habe ich so 296 auswertbare Bilder erhalten. Somit hatte ich Bilder über eine Dauer von sechs Stunden aufgenommen. Somit habe ich die komplette Periode von ungefähr fünfeinhalb Stunden auf jeden Fall abgedeckt. Hinterher beim Sichten der Bilder mit meinem Kursleiter Herr Koch ist uns aufgefallen, dass die Bilder gar nicht die Aufnahme des Filters enthielten, dem sie eigentlich zugeteilt waren. Durch die Kälte in der Nacht hat sehr wahrscheinlich das Filterrad einige Aussetzer gehabt, wodurch ein Filter nach einem Bild beispielsweise sich nicht weitergedreht hat, wodurch das darauffolgende Bild nochmal mit demselben Filter aufgenommen wurde. Es wurde in der Ordnersortierung dennoch dem ursprünglichen Filter zugeteilt, weshalb die Zuordnung innerhalb des Ordners mit den gespeicherten Aufnahmen nicht mehr gewährleistet war und fast jedes Bild einem anderen Filter zugeteilt war. Nachdem diese Panne aufgefallen ist, hat aus zeitlichen Gründen Herr Koch sich jedes Bild angeschaut und es dem Filter zugeordnet, mit dem es auch aufgenommen wurde. Nachdem die eigentlichen Aufnahmen, welche als Lightframes bezeichnet werden, aufgenommen waren, wurden noch Dark- und Flataufnahmen gemacht. Die Darkframes sind Aufnahmen, welche unter geschlossenem Kamerasensor aufgenommen wurden. Somit ist auf diesen Bildern nur das Bildrauschen abgebildet. Ich habe sie mit der gleichen Temperatur und der gleichen Belichtungszeit aufgenommen, damit ich auf den Darkaufnahmen möglichst das gleiche Bildrauschen simuliert habe, wie es auf den Lights zu sehen war. In der Auswertung kann man damit das Bildrauschen fast vollständig aus den Aufnahmen rausrechnen. Die Flats dienen dazu die Staubringe auf der Kameralinse oder dem Teleskop darzustellen. Dazu wird vor dem Teleskop eine Leuchtfläche eingesetzt, sodass die Kamera gegen eine helle Fläche fotografiert.

7. Aufbereitung und Auswertung der Aufnahmen

7.1. Kalibrierung und Registrierung der Aufnahmen

Nachdem alle Aufnahmen abgespeichert waren, wurden diese in den darauffolgenden Stunden des Projektkurses gemeinsam mit Herrn Koch bearbeitet und ausgewertet. Da die einzelnen Aufnahmen noch ein sehr großes Bildrauschen aufwiesen und teilweise Staubringe auf dem Bild zu sehen waren, wurden die Bilder zunächst kalibriert. Dies geschah mit der Software *MaxIm DL*. Zuerst habe ich alle Darkframes und Flatframes mit der Funktion „Set Calibration“ in das Programm hineingeladen. In der abgebildeten Tabelle (Abbildung 19) kann man die einzelnen Eigenschaften der jeweiligen Aufnahmeorder erkennen. So ist neben dem Typen des jeweiligen Bildes die Belichtungszeit, die Bildgröße, das Binning, die Temperatur der Kamera während der Aufnahme und die Anzahl der gemachten Bilder dargestellt. Aus diesen Datensätzen soll die Software im nun für jeden Datensatz ein Durchschnittsbild erstellen. Nachdem alle Aufnahmen hineingeladen waren, erstellt man mit der Funktion „Replace w/Masters“ ein Durchschnittsbild von allen Datensätzen. In der nun erscheinenden Tabelle (Abbildung 20) lässt sich ablesen, dass die Anzahl der Bilder bei allen Datensätzen auf 1 gesetzt ist. Das Programm hat nun mehrere sogenannte Masterdarks und Masterflats erstellt. Mit diesen gemittelten Bildern kann nun weitergearbeitet werden. Um alle eigentlichen Aufnahmen, die Lights, zu kalibrieren, muss von jedem Light der zugeteilte Masterdark subtrahiert werden. Gleichzeitig habe ich die Flats mit ihren Masterdarks subtrahiert. Alle Rechenoperationen wurden durch eine eigene Option der Software durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse beide Subtraktionen durcheinander dividiert. Das Ergebnis der Subtraktion des Lights mit dem Masterdark wurde durch das Ergebnis des Masterflats geteilt. Nachdem dies mit allen Aufnahmen durchgeführt wurde, war jedes Light kalibriet. Anschließend wurde das Bild noch registriert. Hierbei wurden alle Positionen der Sterne auf den Bildern gleichgesetzt. Es kann nämlich vorkommen, dass während einer Aufnahme eines

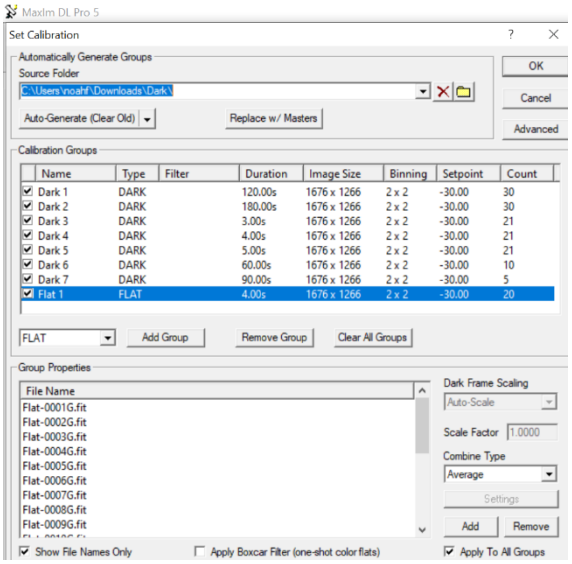


Abbildung 19: Vorbereitung der Kalibrierung aller Darks und Flats

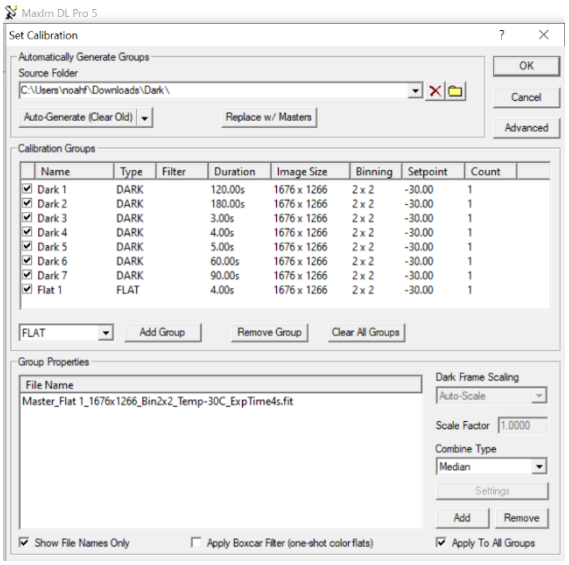


Abbildung 20: Kalibrierung aller Darks und Flats

Objektes nicht auf allen Bildern die Sterne auf genau derselben Stelle bleiben. Beispielsweise kann dies durch eine nicht einwandfreie Mitführung des Motors der Montierung hervorgerufen werden. Um damit verbundene Fehlerquellen im weiteren Verlauf der Auswertung vorzubeugen, werden die Sterne in den Bildern vom Programm auf die gleiche Stelle gesetzt. Diesen Vorgang nennt man Registrierung. Anschließend werden alle fertig kalibrierten und registrierten Bilder in einem von *MaxIm DL* eigens erstelltem Ordner gespeichert.

7.2. Übertragung und Darstellung in Muniwin

Nachdem die Bilder kalibriert und registriert wurden, kam die Software *Muniwin 2.1* (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) zum Einsatz. Dazu wurden zunächst die bisherigen Aufnahmen in die ein neu angelegtes Projekt in der Software hineingeladen. Anschließend mussten erst einmal bestimmte Einstellungen gesetzt werden, damit das Programm weiß, wie es die Bilder richtig auszuwerten und betrachten hat. Zu diesen Einstellungen gehören Einstellungen der Kamera („Camera“), Einstellungen bezüglich der Sternerfassung („Star Detection“), Einstellungen, die die Photometrie betreffen („Photometry“) und Einstellungen, welche überprüfen, ob jeweilige Sterne auf allen Bildern sich an derselben Stelle befinden („Matching“). Diese wurden wie folgt getroffen:

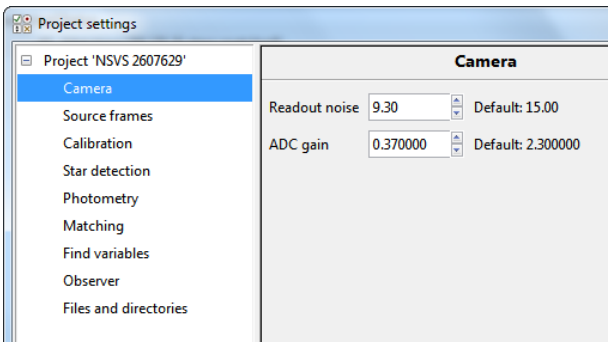


Abbildung 21: Kamera-Einstellungen

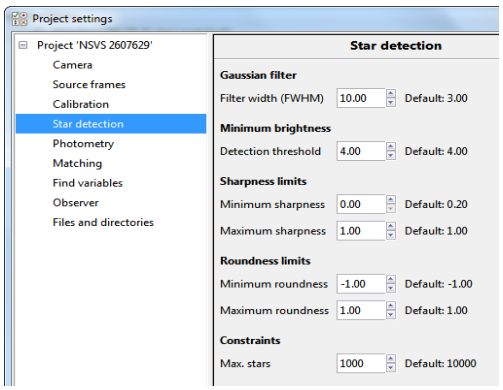


Abbildung 22: Einstellungen zur Sternerfassung

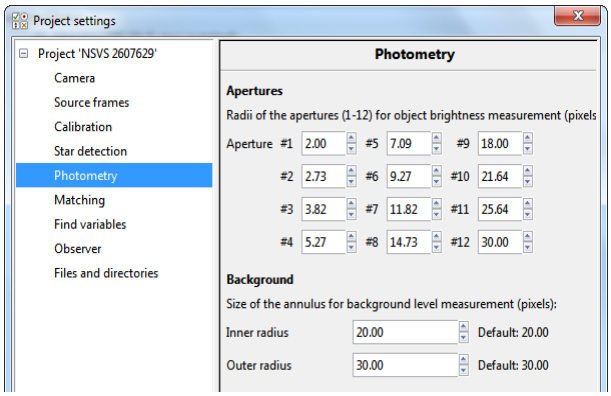


Abbildung 23: Photometrische Einstellungen

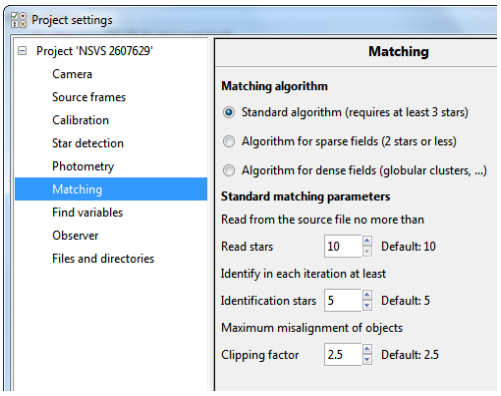
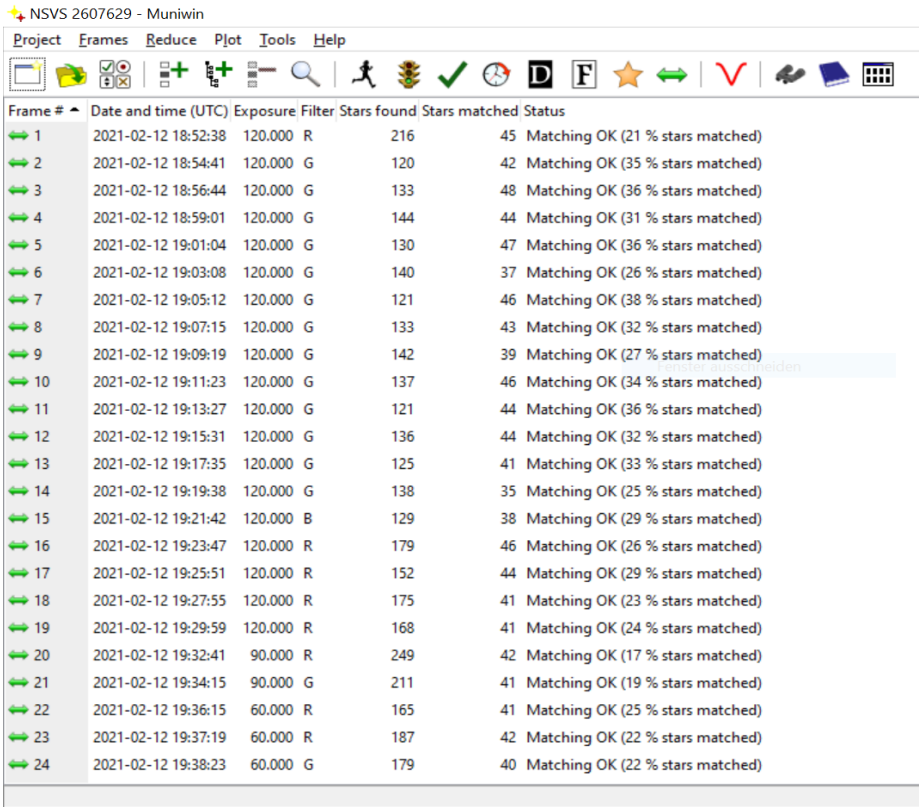


Abbildung 24: Einstellungen zur Sternüberlagerung

Als das Programm alle Einstellungen übernommen hatte, konnte ich die einzelnen Schritte, die auf die Einstellungen zurückzuführen waren, ausführen. Zunächst wurde mit dem Tool „Run photometry“ jedes einzelne Bild betrachtet und das Programm erkannte auf jedem Bild eine unterschiedliche Anzahl an Sternen, da es auch immer wieder einzelne Pixel erkannte, die auf anderen Bildern überhaupt nicht zu erkennen waren. Deshalb legten wir im nächsten Schritt mit dem Werkzeug „Find cross-references between photometry files“ alle Bilder übereinander und das Programm erkannte genau welche Helligkeitserkennungen nun wirklich Sterne waren und somit auf jedem Bild zu erkennen waren und welche Erkennungen nur einfache Pixel waren und somit ausschließlich auf einzelnen Bildern zu erkennen waren. Diese einfachen Pixel wurden daher im weiteren Verlauf unberücksichtigt gelassen. In der Software „Muniwin“ selbst sah der Schirm dann folgendermaßen aus:



Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
1	2021-02-12 18:52:38	120.000	R	216	45	Matching OK (21 % stars matched)
2	2021-02-12 18:54:41	120.000	G	120	42	Matching OK (35 % stars matched)
3	2021-02-12 18:56:44	120.000	G	133	48	Matching OK (36 % stars matched)
4	2021-02-12 18:59:01	120.000	G	144	44	Matching OK (31 % stars matched)
5	2021-02-12 19:01:04	120.000	G	130	47	Matching OK (36 % stars matched)
6	2021-02-12 19:03:08	120.000	G	140	37	Matching OK (26 % stars matched)
7	2021-02-12 19:05:12	120.000	G	121	46	Matching OK (38 % stars matched)
8	2021-02-12 19:07:15	120.000	G	133	43	Matching OK (32 % stars matched)
9	2021-02-12 19:09:19	120.000	G	142	39	Matching OK (27 % stars matched)
10	2021-02-12 19:11:23	120.000	G	137	46	Matching OK (34 % stars matched)
11	2021-02-12 19:13:27	120.000	G	121	44	Matching OK (36 % stars matched)
12	2021-02-12 19:15:31	120.000	G	136	44	Matching OK (32 % stars matched)
13	2021-02-12 19:17:35	120.000	G	125	41	Matching OK (33 % stars matched)
14	2021-02-12 19:19:38	120.000	G	138	35	Matching OK (25 % stars matched)
15	2021-02-12 19:21:42	120.000	B	129	38	Matching OK (29 % stars matched)
16	2021-02-12 19:23:47	120.000	R	179	46	Matching OK (26 % stars matched)
17	2021-02-12 19:25:51	120.000	R	152	44	Matching OK (29 % stars matched)
18	2021-02-12 19:27:55	120.000	R	175	41	Matching OK (23 % stars matched)
19	2021-02-12 19:29:59	120.000	R	168	41	Matching OK (24 % stars matched)
20	2021-02-12 19:32:41	90.000	R	249	42	Matching OK (17 % stars matched)
21	2021-02-12 19:34:15	90.000	G	211	41	Matching OK (19 % stars matched)
22	2021-02-12 19:36:15	60.000	R	165	41	Matching OK (25 % stars matched)
23	2021-02-12 19:37:19	60.000	R	187	42	Matching OK (22 % stars matched)
24	2021-02-12 19:38:23	60.000	G	179	40	Matching OK (22 % stars matched)

Abbildung 25: Der fertige Datensatz in Muniwin

Damit war der gesamte Datensatz in *Muniwin* hineingeladen und die Software wusste genau, wie sie im weiteren Verlauf damit umzugehen hatte. Der nächste Schritt war es jetzt eine erste Lichtkurve zu erstellen. Dies wurde mit dem Werkzeug „Plot Light Curve“ getätigt. Hierbei mussten ebenfalls Einstellungen eingetragen und übernommen werden, damit das Programm weiß unter welchen Umständen es gegebenenfalls bestimmte Fremdeinwirkungen herausrechnen soll. Die getätigten Einstellungen sahen wie folgt aus:

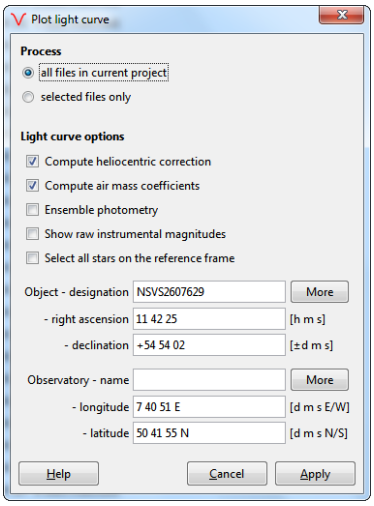


Abbildung 26: Einstellungen der Lichtkurve

Der Einstellungsbereich „Process“ ist ausschließlich dafür da, um gegebenenfalls dem Programm mitzuteilen, dass nur bestimmte Bilder für die Lichtkurve genutzt werden sollen. Hier war dies allerdings nicht der Fall, weshalb ich auch alle Bilder genutzt habe. Unter „Light curve options“ waren nur die Punkte „Compute heliocentric correction“ und „Compute air mass coefficients“ zu bestätigen. Einerseits wurde so die Rotation der Erde berücksichtigt und andererseits wurden so Einwirkungen der Erdatmosphäre herausgerechnet. Da die Aufnahme über fünf Stunden dauerte und der Doppelstern so sich währenddessen immer mehr auf den Zenit zubewegt hat, würde die Atmosphäre die Auswertung verfälschen. Daher wird diese Einwirkung vom Programm berücksichtigt. Im nächsten Schritt sollte festgelegt werden, welcher Stern der Stern ist, von dem man die Lichtkurve sehen möchte. Allerdings musste der sogenannte „Variable“ mit einem Vergleichsstern („Comparison“) verglichen werden, um einen Vergleichswert der Helligkeit zu haben. Das Programm subtrahiert die Helligkeiten voneinander, um einen Helligkeitswert angeben zu können. Ein möglicher Vergleichsstern muss eine möglichst konstante Helligkeit besitzen und eine recht gleiche Verteilung der Farben Rot, Grün und Blau haben, damit auf der Lichtkurve die Farben nicht getrennt voneinander aufgetragen sind, sondern möglichst auf einer Linie. Da man zu Beginn der Auswahl nicht weiß, welcher Stern sich als Vergleichsstern eignet, nimmt man einen völlig zufällig gewählten und wählt zusätzlich noch einige „Check“ Sterne aus, um bei der Auswertung recht schnell überprüfen zu können welcher Stern sich eignet und welcher nicht. Wenn man einen guten Stern gefunden hat, ändert man diesen im Nachhinein zum Vergleichsstern.

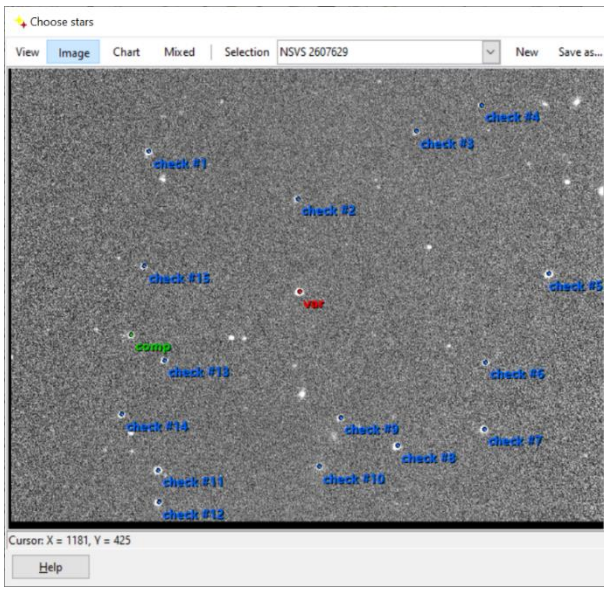


Abbildung 27: Auswahl des Referenzsterns und der „Check“-Sterne

Als ein guter Vergleichsstern hat sich der in grün dargestellte mit „comp“ beschriftete Stern herausgestellt, da bei ihm alle drei genutzten Farben auf einer Linie liegen. Nun kann man sich die Frage stellen, welcher Stern dieser Vergleichsstern ist. Um dieser Frage zu klären, habe ich in der Software *Stellarium* den Veränderlichen aufgesucht und versucht in etwa denselben Bildausschnitt wie auf den Aufnahmen zu finden. Durch diese Vorgehensweise bin ich auf den Stern 2MASS J11430952+5451510 gestoßen. Dieser Stern ist zudem auch der gleiche Referenzstern, der von B. Gürol und R. Michel in ihrer Arbeit „BVR photometric study of NSVS

2607629. A high mass-ratio W-type W Uma system“ (2017) verwendet wurde.[27]

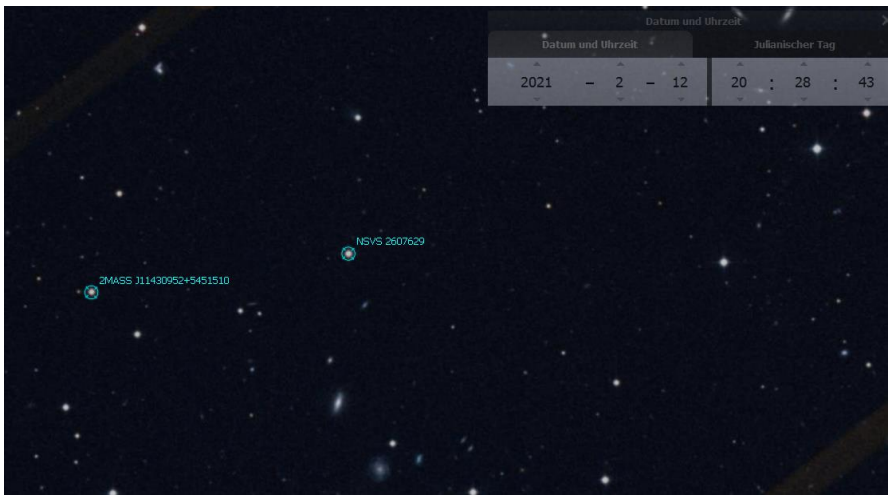


Abbildung 28: Rekonstruktion der Aufnahme in Stellarium mit Veränderlichem und Referenzstern

Im nächsten Schritt muss die Apertur gewählt werden. Sie ist der Durchmesser des inneren Messkreises um den Stern. Die Intensitäten der einzelnen Pixel werden innerhalb dieses Kreises zusammenaddiert. In einem größeren Kreis um den Stern wird dann die Intensität des Himmels gemessen. Die Intensität wird von der Intensität des äußeren Kreises subtrahiert. Das Ergebnis spiegelt die wirkliche Intensität des Sterns wider. Das Programm zeigt ein Diagramm, welches verschiedene Ergebnisse eines Messkreisdurchmesser aufzeigt. Auf einer Kurve kann man auswählen, welches Ergebnis man bevorzugt. Um das genauste Ergebnis von dem Durchschnitt aller Bilder zu erzielen, sollte man den tiefsten Punkt im Diagramm wählen. In meinem Beispiel hat sich die sechste Apertur als das beste Ergebnis gegenüber den meisten Check-Sternen herausgestellt. Im Nachhinein kann man diesen Wert aber immer noch anpassen. Anschließend erhält man das erste Ergebnis meiner Lichtkurve.

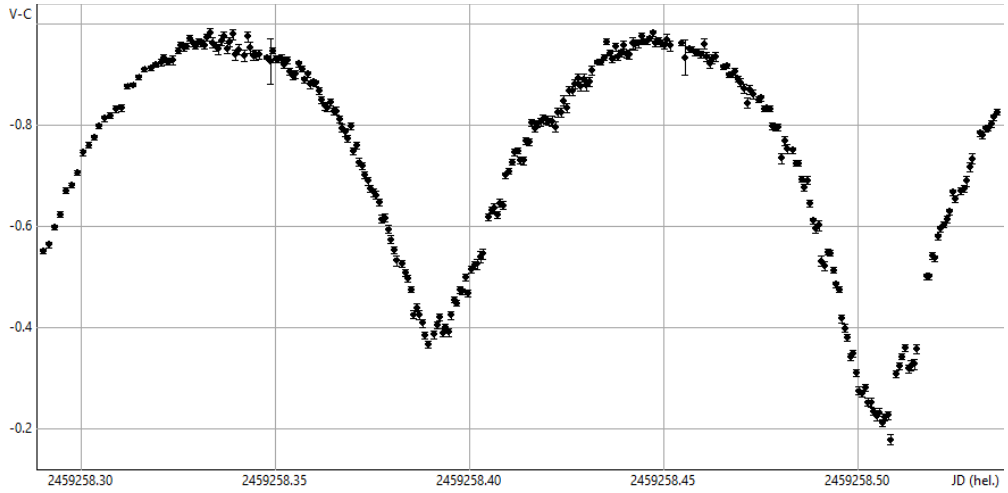


Abbildung 29: Erste Lichtkurve des Sterns NSVS 2607629 zum Vergleichsstern 2MASS J11430952+5451510 mit aufsummierten RGB-Helligkeiten

[27] (PDF) BVR photometric study of NSVS 2607629. A high mass-ratio W-type W UMa system (researchgate.net); zuletzt eingesehen am: 22.04.2021

Es lässt sich in dem Diagramm eine komplette Periode erkennen. Auffallend ist, dass die y-Achse noch die Differenz des Veränderlichen gegenüber des Vergleichsstern aufweist. Im weiteren Verlauf der Auswertung soll dort die relative Helligkeit V [mag] aufgetragen werden. Die x-Achse hingegen zeigt das Julianische Datum, welches noch gegen die jeweilige Phase der Bedeckung ausgetauscht wird. Bei diesem Diagramm ist es allerding zufällig so, dass alle drei genutzte Filterfarben in einer Kurve liegen. Der Grund dafür liegt in dem Vergleichsstern. Seine Spektralfarben liegen wahrscheinlich genau so, dass in dem Diagramm alle Farben in einer Kurve liegen. Wählt man einen anderen Vergleichsstern, so erhält man in der Regel drei Kurven, die übereinander im Diagramm liegen. Um dies auch nochmal zu zeigen, habe ich als Vergleichsstern den „Check“-Stern 11 (Abbildung 27) ausgewählt.

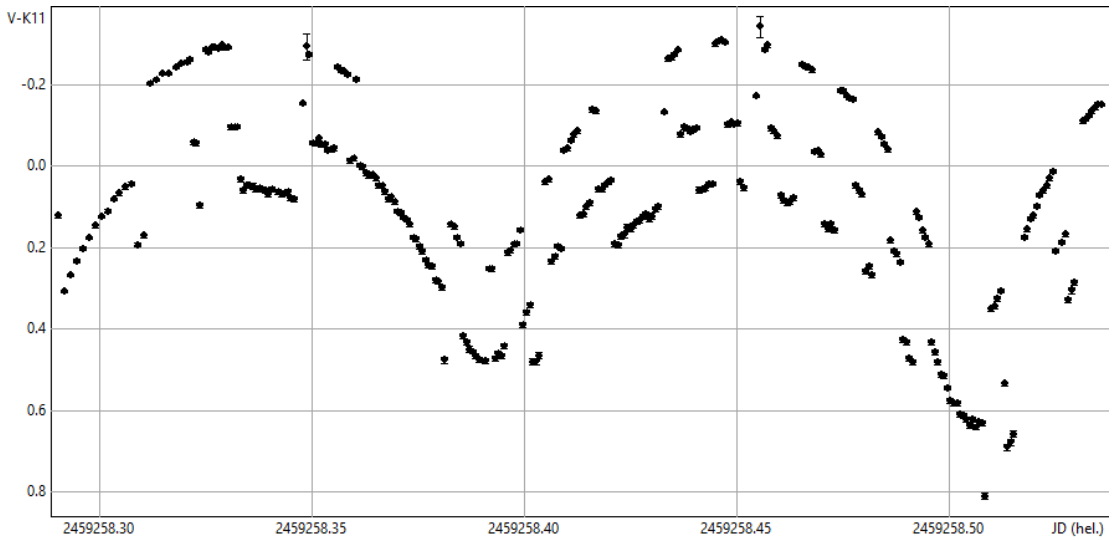


Abbildung 30: Lichtkurve des Doppelsterns zum elften „Check"-Stern

Es lässt sich klar erkennen, dass drei Kurven im Diagramm auftauchen. Die oberste Kurve zeigt alle Punkte des Rotfilters, wogegen die mittlere alle Bilder des Grünfilters darstellt. Die unterste Kurve zeigt dementsprechend alle Aufnahmen des Blaufilters. Wählt man einen anderen Vergleichsstern aus, so lassen sich in der Regel immer drei untereinanderliegende Kurven erkennen. Es kommt nur sehr selten vor, dass alle drei Kurven der verschiedenen Filter in einer Kurve liegen, wie es bei dem Stern 2 MASS J11430952+5451510 der Fall ist.

7.3. Lichtkurvenerstellung mit Periodenberechnung

Um die Achsen richtig aufzutragen und anschließend daraus einige Parameter zu bestimmen, wurden zuerst alle Daten in einer Textdatei abgespeichert. Zu den übertragenden Daten gehörte zunächst die Nummer des jeweiligen Frames und das dazugehörige Julianische Datum, sowie die Differenz des jeweiligen Wertes von der Helligkeit des Veränderlichen und des Referenzsternes. Zudem wurde auch der jeweilige Wert der Abweichung mit aufgenommen. Dieser Wert zeigt die Abweichung sowohl in die positive als auch in die negative Richtung. Des Weiteren wurden die Werte zur Berücksichtigung der Atmosphäre und die jeweilige Höhe des Objektes über dem Horizont mitaufgetragen. Diese Werte können im weiteren Verlauf allerdings unberücksichtigt gelassen werden, da sie für die restliche Auswertung unwichtig sind. Um nun auf der y-Achse des Diagramms die relative Helligkeit des Veränderlichen auftragen zu können, muss der Differenzwert aus der übertragenden Tabelle mit der visuellen Helligkeit des Vergleichssterns addiert werden. Diese Summe ist dann die visuelle Helligkeit des Doppelsterns. Die Helligkeit des Vergleichsstern 2MASS J11430952+5451510 ist nach B. Gürol und R. Michel 13,268 mag. Somit ist die Differenz der Helligkeiten mit der visuellen Helligkeit des Sternsystems NSVS 2607629 ausgetauscht worden. Nun soll auf die x-Achse, wo sich bisher das Julianische Datum befand, die Phase der Bedeckung aufgetragen werden. Dazu ist allerdings ein Zwischenschritt nötig. Zunächst muss jedes Julianische Datum, welches im Diagramm einem Wert zugeordnet ist, mit dem allerersten Julianischem Datum subtrahiert werden. Somit ist der erste Wert null und die anderen Werte werden fortlaufend größer. Um nun zu der Phase der Bedeckung zu gelangen, muss jeder Wert der Zwischenrechnung durch die Dauer einer kompletten Periode geteilt werden. Demnach muss zunächst die Periode möglichst genau berechnet werden. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen könnte man sich Punkte auf der Lichtkure suchen, die zweimal vorkommen suchen und diese subtrahieren. Da meine Lichtkurve etwas mehr als einen Umlauf aufweist, wäre dieses Verfahren möglich. Allerdings ist es auch recht ungenau und es können einfach Fehler entstehen, da aufgrund der Menge der Punkte nicht immer eindeutig ist, welcher Punkt auf derselben Höhe ist wie ein Punkt einen Umlauf zuvor. Zum anderen könnte man sich die beiden Minima angucken und versuchen einen Tiefpunkt auszumachen. Anschließend bildet man wieder die Differenz der Minima bilden und diesen Wert verdoppeln. Dadurch entsteht der Wert für eine Periode. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass dieses Verfahren nur zielführend ist, wenn die

	A	B	E	F	G	H
1	FRAME	JDHEL	Var-Comp [mag]	s1 [mag]	AIRMASS	ALTITUDE [grad]
3	1	2459258,2904330	-0,55044	0,00501	1,7839	34,00
4	2	2459258,2918576	-0,56345	0,00507	1,7738	34,22
5	3	2459258,2932730	-0,59756	0,00504	1,7639	34,44
6	4	2459258,2948589	-0,62380	0,00621	1,7528	34,69
7	5	2459258,2962901	-0,67104	0,00514	1,7430	34,91
8	6	2459258,2977252	-0,68138	0,00532	1,7332	35,14
9	7	2459258,2991527	-0,70597	0,00480	1,7236	35,37
10	8	2459258,3005845	-0,74571	0,00515	1,7140	35,60
11	9	2459258,3020153	-0,76067	0,00520	1,7045	35,83
12	10	2459258,3034487	-0,77609	0,00510	1,6952	36,06
13	11	2459258,3048831	-0,79780	0,00495	1,6859	36,29
14	12	2459258,3063170	-0,81318	0,00497	1,6766	36,52
15	13	2459258,3077493	-0,81904	0,00532	1,6675	36,76
16	14	2459258,3091839	-0,83223	0,00662	1,6585	36,99
17	15	2459258,3106136	-0,83417	0,00643	1,6496	37,22
18	16	2459258,3120653	-0,87704	0,00408	1,6406	37,46
19	17	2459258,3134976	-0,88028	0,00395	1,6319	37,70
20	18	2459258,3149302	-0,89495	0,00431	1,6232	37,94
21	19	2459258,3163620	-0,91003	0,00405	1,6147	38,18
22	20	2459258,3182424	-0,91321	0,00464	1,6035	38,49

Abbildung 31: Excel Tabelle mit übertragenden Werten aus Muniwin

Bahn der beiden Sterne möglichst kreisförmig ist und somit die Minima symmetrisch sind. Bei dem vorliegenden System bin ich von dieser Bedingung ausgegangen, da es keine Anzeichen darauf gibt, dass die Form der Bahn in irgendeiner Form ellipsenähnlich ist. Daher habe ich die Minima einzeln in einem Diagramm betrachtet und jeweils durch *Excel* (Kapitel 10.2. Softwareverzeichnis) eine Trendline einfügen lassen, welche einer Funktion zugewiesen war. Die Zahlen auf der x-Achse, wo das Julianische Datum aufgetragen ist, wurde mit der Zahl 2459250 subtrahiert, damit die Zahlen noch lesbar sind.

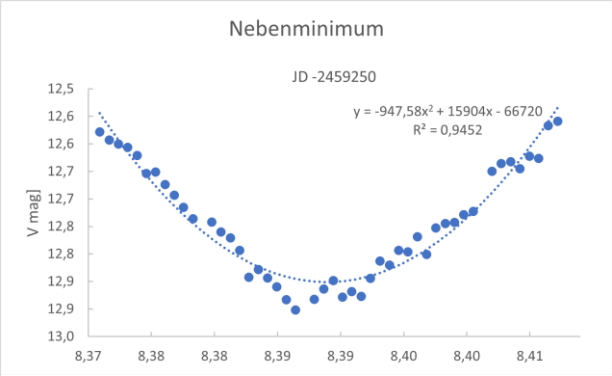


Abbildung 32: Auswertung Nebenminimum

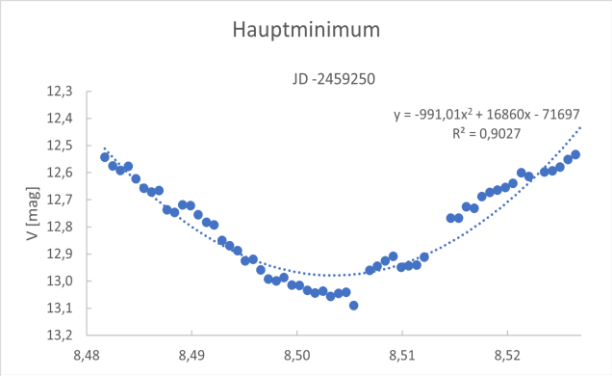


Abbildung 33: Auswertung Hauptminimum

Beiden Minima sind nun durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben. Um die Tiefpunkte dieser Funktionen zu bestimmen, muss jeweils die erste Ableitung gleich null gesetzt werden.

$y(NM) = -947{,}58x^2 + 15904x - 66720$	$y(HM) = -991{,}01x^2 + 16860x - 71697$
$y'(NM) = -1895{,}16x + 15904$	$y'(HM) = -1982{,}02x + 16860$
$y'(NM) = 0$	$y'(HM) = 0$
$x = 8{,}3919036$	$x = 8{,}506473$

Da nur ein Wert für x berechnet wurde, haben beide Polynome nur einen Extrempunkt. Im Diagramm lässt sich bereits erkennen, dass es einen Tiefpunkt geben muss, weshalb nicht mit der zweiten Ableitung geprüft werden muss, ob der jeweilige x-Wert ein Hoch- oder Tiefpunkt ist. Der y-Wert des x-Wertes ist ebenfalls irrelevant, da die Magnitude bei der Bestimmung der Periode nicht notwendig ist. Nun müssen die beiden Ergebnisse für die Minima voneinander subtrahiert werden, um die halbe Periode zu erhalten.

$$8{,}506473 - 8{,}3919036 = 0{,}1145694$$

Um den endgültigen Wert der Periode zu erhalten, muss dieses Ergebnis für die halbe Zeit eines Umlaufes mit dem Faktor 2 multipliziert werden.

$$0{,}1145694 * 2 = 0{,}2291388$$

Ein kompletter Umlauf des Doppelsternsystems beträgt demnach 0,2291388 Tage. Somit kann nun die endgültige Lichtkurve fertiggestellt werden. Dazu muss die oben erwähnte Zwischenrechnung durch die Periode, welche ich gerade errechnet habe, geteilt werden. Die Ergebnisse bilden dann mit ihren korrespondierenden Magnituden Werten die Werte für die Phase der Bedeckung. Daraus resultiert folgende Lichtkurve:

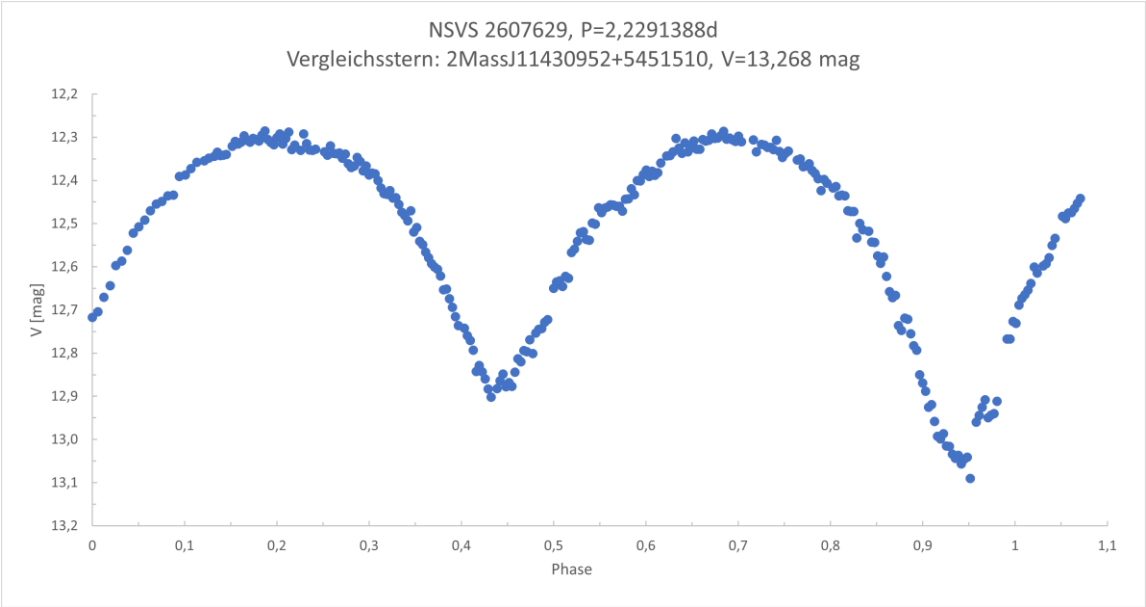


Abbildung 34: Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit RGB Helligkeiten

Um die eigentliche drei Kurven der drei Filterfarbe auseinander zu halten, habe ich einmal eine Lichtkurve mit nur dem Grünfilter erstellt. Ich habe mir diese Farbe ausgesucht, da ich durch die Aussetzer des Filterrades zufälligerweise von dieser Farbe die meisten Bilder hatte. Mein Kursleiter Herr Koch hat freundlicherweise das Raussuchen der Grünfilterbilder aus zeitlichen Gründen übernommen. Insgesamt waren es 124 Bilder, die durch den Grünfilter aufgenommen wurden. Mit diesen Aufnahmen wurde alles genauso durchlaufen, wie vorher mit allen Bildern. Nachdem alle Daten in einer weiteren Exceltabelle eingetragen worden waren, habe ich erneut die Helligkeit V [mag] auf die y-Achse und die Phase auf die x-Achse aufgetragen. Das daraus resultierende Diagramm sieht folgendermaßen aus:

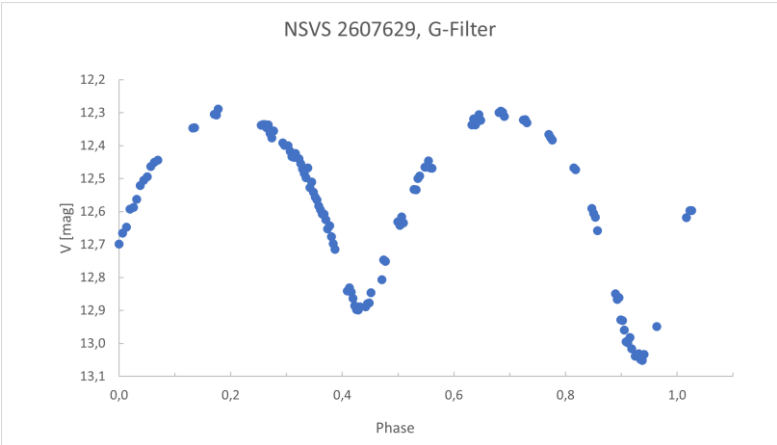


Abbildung 35: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 im Grünfilter

Die Lichtkurve des Grünfilters sieht logischerweise fast genauso aus wie die bisher dargestellt Lichtkurve mit allen Farben, da hierbei nur alle Fotos des Grünfilters abgebildet sind. Darin liegt auch der einzige Unterschied, dass bei dieser Kurve die Bilder aus dem Rotfilter und dem Blaufilter nicht abgebildet sind. Um die Kurven nun noch besser mit anderen vergleichen zu können, kann man die y-Achse noch auf normalized Flux, zu dt. Fluss, definieren. Dies ist kein Muss, kann aber gerade im Vergleich mit andern Lichtkurven sehr hilfreich sein, da man so einfacher die jeweiligen Unterschiede und Differenzen zwischen den jeweiligen Minima und Maxima ablesen kann. Wenn beispielsweise jemand anderes die Lichtkurve des gleichen Sternsystems aufgenommen hat, kann diese so einfacher vergleichen, da beide auf der y-Achse genormt sind und der jeweilige Referenzstern möglichst wenig Unterschiede durch die Helligkeit verursacht. Andererseits können so auch Lichtkurven verschiedener Sterne einfacher gegenübergestellt werden. Zudem kann mit der Fluss-Größe in der Astrophysik viele weitere physikalischen Größen berechnet werden. Das Verfahren funktioniert durch das folgende Weber-Fechnersche Gesetz.

$$m_1 - m_0 = \Delta m = -2{,}5\, log_{10} \frac{I_1}{I_0}$$

Dieses besagt, dass der Helligkeitsunterschied $\Delta \mathrm{m}$ proportional zu dem Logarithmus multipliziert mit dem Quotienten beider Intensitäten ist. Die $-2{,}5$ kommen durch die Konstante k zu Stande, welche besagt, dass fünf Größenklassen in Magnituden dem Logarithmus von 100 entsprechen. Die Formel muss zur Berechnung des Flusses nach $\frac{\mathrm{I}_1}{\mathrm{I}_0}$ umgestellt werden. Daraus ergibt sich:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-0{,}4 * \Delta m}$$

Das hier in der Ausgangsformel eine Logarithmusfunktion auftaucht, hängt damit zusammen, dass das menschliche Auge bei zunehmender Intensität einer Lichtquelle eine logarithmisch zunehmendes Helligkeitsempfinden aufweist. Eine Kamera weist im Gegensatz dazu einen linearen Zusammenhang auf. Mit der nun umgestellten Funktion kann der jeweilige Fluss-Wert berechnet werden. Dazu nimmt man den maximalen Magnituden Wert im ersten Maximum und setzt diesen in die Formel für m_0 ein. Für m_1 setzt man den jeweiligen Wert der Magnitude ein, der umgewandelt werden soll. Setzt man diese Formel in *Excel* in eine neue Spalte ein, so erhält man für die Lichtkurve, welche all drei Farben beinhaltet, folgendes Ergebnis:

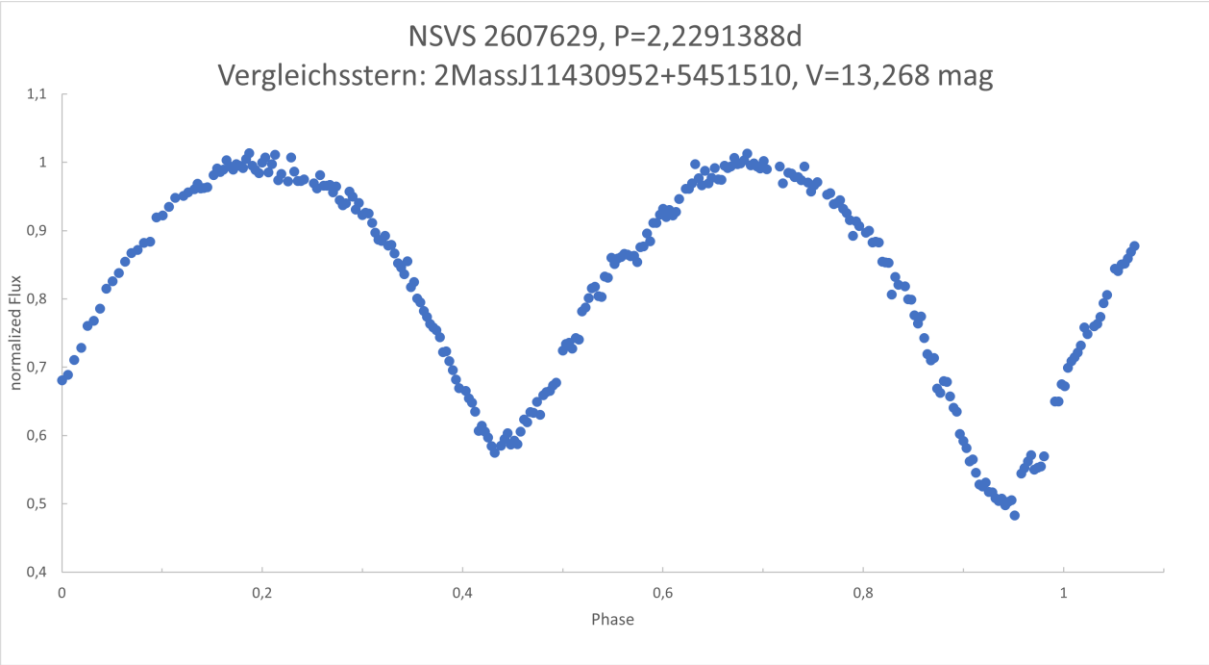


Abbildung 36: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit RGB-Helligkeiten; aufgetragen ist die Phase (x-Achse) und der Fluss (y-Achse)

Die Kurve ist im Grunde gleichgeblieben und sieht dementsprechend fast identisch aus. Allerdings kann diese Lichtkurve, wie bereits geschildert, besser mit den Ergebnissen von Profiastronomen verglichen werden. Dieses Verfahren habe ich auch auf die Lichtkurve mit den Bildern des Grünfilters angewandt.

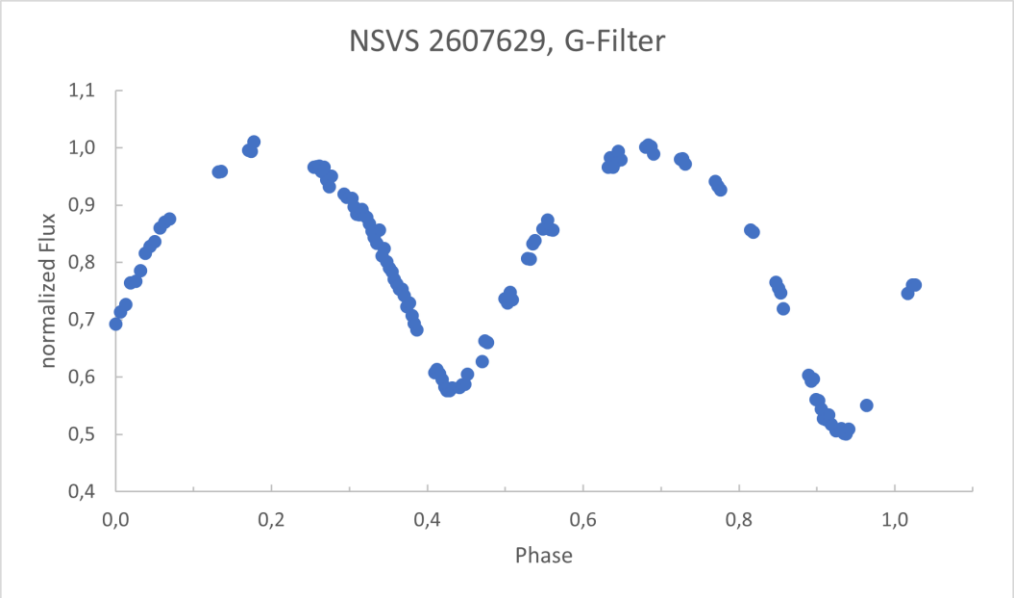


Abbildung 37: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit dem Grünfilter; aufgetragen ist die Phase (x-Achse) und der Fluss (y-Achse)

Durch diesen Schritt ist die Lichtkurve nun vollständig aufgetragen und mit der Periode habe ich auch schon den ersten Parameter bestimmt. Im nächsten Schritt sollen nun weitere Parameter des Sternsystems anhand einiger Formeln berechnet werden.

7.4. Berechnung weiterer Parameter

Nachdem die Periode schon berechnet wurde, kommt die Frage auf, welche Parameter zusätzlich möglichst genau bestimmt werden können. Mit Hilfe von Newtons Formulierung des dritten Keplerschen Gesetzes (Kapitel 3.4. Das dritte Keplersche Gesetz) lässt sich mit der Periode und dem Abstand die gemeinsame Masse der beiden Sterne in Sonnenmassen angeben. Demnach wäre:

$$\frac{P[J]^2}{a[AE]^3} = M_1[\odot] + M_2[\odot]$$

Dinko P. Dimitrov und Diana P. Kjurkchieva fanden in ihrer Arbeit „Ultrashort-period main-sequence eclipsing systems: new observations and light-curve solutions of six NSVS binaries“ (2015)[28] einen empirischen Zusammenhang zwischen der Periode P[d] und dem Abstand a [R⊙] bei kurzperiodischen Veränderlichen.

$$a[R\ \odot] = -1{,}154 + 14{,}633P - 10{,}319P^2\ , P[d]$$

Mit der eingesetzten Periode folgt:

$$a[R\ \odot] = 1{,}657193$$

Dabei ist ein $R_\odot$ (ein Sonnenradius):

$$R_\odot = 6{,}96342 * 10^8 m$$

Daher ergibt sich der Abstand in Metern:

$$a[m] = 1{,}153973 * 10^9$$

Bevor die Periode und der Abstand in das dritte Keplersche Gesetz eingesetzt werden können, müssen die Werte noch umgerechnet werden. Die Periode ist bisher immer in Tagen angegeben worden. Im dritten Keplerschen Gesetz muss die aber in Jahren angegeben werden. Ein Jahr entspricht 365,2425 Tagen. Eine Periode P[d] auf den Tag berechnet, hatte ich bereits mit 0,2291388 bestimmt. Daher ist die Periode wie folgt zu bestimmen:

$$P[J] = P[d] * 365{,}2425 = 6{,}2736 * 10^{-4} a$$

Bei dem Abstand ist es ähnlich. Diesen habe ich gerade in Metern angegeben. Er muss allerdings auf Astronomische Einheiten, der mittlere Abstand von der Erde zur Sonne, hochgerechnet werden. Eine Astronomische Einheit entspricht:

$$1AE = 1{,}495978707 * 10^{11} m$$

[28] Ultrashort-period main-sequence eclipsing systems: new observations and light-curve solutions of six NSVS binaries | Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | Oxford Academic (oup.com); zuletzt eingesehen am: 22.04.2021

Um daraus den Abstand in AE zu erhalten, muss der Abstand in Metern a[m] durch den Wert für eine Astronomische Einheit dividiert werden:

$$\frac{1{,}153973 * 10^{9}m}{1{,}1495978707 * 10^{11}m} = 7{,}71383 * 10^{-3}AE$$

Nun können beide Werte in die Formel des dritten Keplerschen Gesetzes eingesetzt werden, wodurch sich die Gesamtmasse des Systems in Sonnenmassen angeben lässt.

$$M_1 + M_2 = \frac{(6{,}2736 * 10^{-4}a)^2}{(7{,}71383 * 10^{-3}AE)^3} = 0{,}8577\ M\odot$$

Hier sind nun alle bisherigen gemesseneren und errechneten Parameter aufgelistet:

Parameter	**Ergebnisse**
Periode **P[d]**	0,2291388
Periode **P[J]**	$6{,}2736 * 10^{-4}$
Abstand **a[R⊙]**	1,657193
Abstand **a[AE]**	$7{,}7138 * 10^{-3}$
Gesamtmasse $\mathbf{M_1 + M_2}$	0,8577M⊙

Ein weiterer Parameter, der bestimmt werden könnte, wäre das Massenverhältnis der beiden Sterne. Dazu müsste eine Annäherung über das Hertzsprung-Russell-Diagramm getroffen werden. Durch die Gesamtmasse des Systems ist anzunehmen, dass sich das Sternsystem auf der Hauptreihe des Diagramms befindet. Auf dieser gilt:

$$L \sim M^{3,5}$$

Somit kann auch von dem Masseverhältnis ausgegangen werden, dass es sich ähnlich zum Leuchtkraftverhältnis verhält:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{3,5}$$

Um jedoch an die Leuchtkraft zu gelangen, muss zudem auf das Verhältnis der Radien geachtet werden. Daher müssen zu viele Annahmen getroffen werden, um ein vertretbares und stimmiges Ergebnis zu erhalten. Mit einfachen Formeln kommt man nicht weiter. Es müsste ein Modell erschaffen werden, worin die einzelnen Parameter so aufeinander abgestimmt werden, dass das System in sich stimmig ist und mit allen Beobachtungen übereinstimmt. Diese Modellerschaffung wäre allerdings sehr aufwendig und würde den Rahmen einer Projektarbeit übersteigen.

8. Bewertung der Ergebnisse

8.1 Vergleich der Ergebnisse mit Gürol und Michel

In diesem Abschnitt sollen meine Beobachtungen, Messungen und Rechnungen, mit denen von Profiastronomen verglichen werden. Zwar gibt es bisher nicht viele wissenschaftlich astronomische Arbeiten, die sich mit dem Doppelsternsystem NSVS 2607629 befasst haben. Dennoch werde ich im Folgenden die Ergebnisse von B. Gürol und R. Michel heranziehen. Ich habe mich bereits bei der Wahl des Referenzsterns und bei den Grundlagen des Doppelsternsystems auf diese Arbeit bezogen. Folgende Tabelle zeigt die bestimmten Parameter beider Ergebnisse:

Parameter	**B. Gürol und R. Michel**	**Eigene Messungen**
P[d]	0,229451 / 0,229385	0,2291388
a[R$\odot$]	1,66$\pm$0,05	1,657193
Gesamtmasse [M$\odot$]	1,165$\pm$0,105	0,8577

Es ist klar erkennbar, dass die Periode P[d] und der Abstand a[R$\odot$] relativ nah beieinander liegen. Die Differenz der Periode beträgt 21,27 Sekunden bzw. 26,97 Sekunden. Diese Differenz spiegelt ein solides Ergebnis wider. Dennoch bleibt die Frage, warum Gürol und Michel zwei verschiedene Werte für ihre Periode angegeben haben. Sie hatten den Wert 0,229451 Tage als durchschnittliche Periode berechnet und angegeben. Als sie aber zu ihren Berechnungen übergehen, nutzen sie den Wert 0,229385 Tage, ohne zu erklären, woher dieser stammt. Der Abstand a[R$\odot$] haben sie mit der gleichen Formel von Dinko P. Dimitrov und Diana P. Kjurkchieva der kurzperiodischen Doppelsterne berechnet. Sie haben zwar eine andere Periode eingesetzt, kommen aber zu einem Ergebnis, welches nur minimal von meinem abweicht, da die Periode ohnehin schon sehr ähnlich ist. Allerdings weicht mein Ergebnis für die Gesamtmasse des Systems von dem von Gürol und Michel stark ab. Die Differenz beider Werte beträgt 0,3073 Sonnenmassen. Wenn man bedenkt, dass eine Sonnenmasse etwa $1{,}98892 * 10^{30}$Kilogramm entspricht[29], betrüge dies ein Unterschied von $6{,}11195 * 10^{29}$Kilogramm zwischen dem Ergebnis der Profiastronomen und mir. Zurückzuführen ist diese enorme Differenz auf die unterschiedlichen Werte der Perioden. Auch wenn dieser Unterschied in der Periode nur 21,3 Sekunden beträgt, wirkt dieser sich im dritten Keplerschem Gesetz sehr stark aus, da die Werte jeweils quadriert bzw. kubiert werden. Dadurch entsteht eine auffällig starke Abweichung. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie anfällig die Formeln in der Astrophysik durch nur minimale Abweichungen sind.

[29] https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenmasse; zuletzt eingesehen am 23.04.2021

8.2. Vergleich der Lichtkurve mit Gürol und Michel

Neben den Parametern ist es ratsam auch die Lichtkurve zu vergleichen, da aus hypothetischen Unterschieden sich einiges über das Doppelsternsystem und gegebenenfalls Veränderungen sagen lässt. Diese Unterschiede müssen sich nicht einmal in den resultierenden Parametern widerspiegeln. Vergleicht man Gürols und Michels Lichtkurve (Abbildung 38) mit meiner (Abbildung 36), kommt man recht schnell zu dem Schluss, dass sich beide Lichtkurven ähneln. Die Werte beider Minima sind in etwa identisch und auch das erste Maximum sieht sehr ähnlich aus. Allerdings weist das zweite Maximum in der Arbeit der Profiastronomen ein Hotspot auf und das Maximum ist zudem höher als das erste. Da beide Sterne an den Stellen des Maximums nebeneinanderstehen, könnte man die Lichtkurve der Profiastronomen so deuten, dass die Rückseite des einen Sterns bzw. die Vorderseite des andern unterschiedlich ausgeprägt sind im Gegensatz zu der Vorderseite bzw. der Rückseite im Maximum vorher. Dies würde bedeuten, dass ein Stern auf einer Seite ein Hotspot aufweist, welches erst bei einer Drehung der Sterne auffällt. Nun habe ich bei meiner Lichtkurve diese Beobachtung nicht gemacht. Dies könnte damit zusammenhängen, dass ich alle drei Farbfilter auf eine Linie gebracht habe und Gürol und Michel im vorliegenden Diagramm gar keinen Filter genutzt haben. Wenn man sich hingegen meine Grünfilterlichtkurve anschaut (Abbildung 37), kann man ebenfalls kein Hotspot ausmachen und die Maxima sind ebenfalls auf etwa derselben Höhe angeordnet. Nun steht die Frage im Raum, warum ist bei Gürols und Michels Lichtkurve ein Hotspot auszumachen und bei meiner nicht. Da mir bisher keine weiteren Veröffentlichungen oder wissenschaftliche Arbeiten vorliegen, lässt sich diese Frage auch erstmal nicht mit einer Lichtkurve eines Dritten beantworten. Es könnte dennoch sein, dass sich im Doppelsternsystem etwas geändert hat. Zumal die Messungen von Gürol und Michel aus dem Jahr 2016 sind und zwischen den Beobachtungen etwa fünf Jahre lagen, kann diese Möglichkeit in Betracht gezogen werden. Worin die mögliche Veränderung besteht, kann zu jetzigem Stand noch nicht beantwortet werden, da die Bedingungen zu der Aufnahmezeit der Daten nicht optimal waren. Dadurch wäre es denkbar, dass in den Messungen Fehler eingeflossen sind.

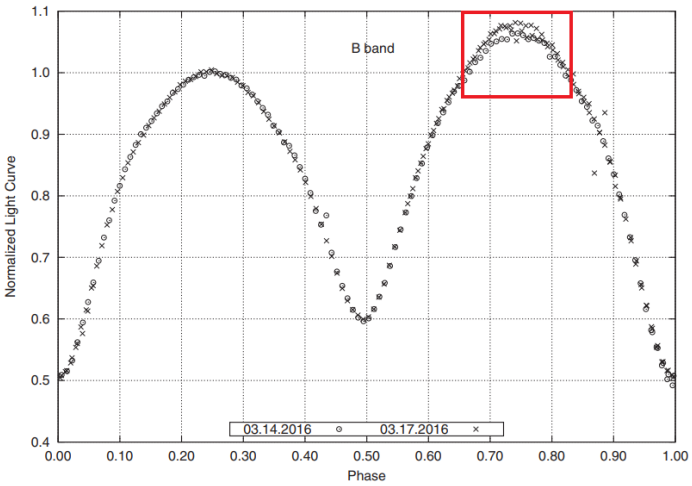


Abbildung 38: Gürols und Michels Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Gürols und Michels Messungen im Vergleich zu meinen Messungen besteht darin, dass ich andere Filter mit anderen Transmissionen benutzt habe. Ich habe die RGB-Filter (Kapitel 4.5 Die RGB-Filter) von Baader benutzt, wogegen Gürol

und Michel Filter genutzt haben, welche nach der klassischen Johnson-Cousins Filterart aufgebaut sind. Das bedeutet, dass die genutzten Filter der Profiastronomen nicht genau die gleichen Bereiche im Spektralbereich abdecken, wie die Filter von Baader. Die Filter B, V und R sind das Pendant zu den von mir genutzten R, G und B Filtern. Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Filter nach dem Johnson-Cousins System (Abbildung 39) nicht so konstant sind, wie die Filter von Baader, da sie nur einen kleinen Teil im Spektrum vollständig durchlassen. Die Filter von Baader hingegen lassen fast die vollständigen Transmissionen konstant durch (Abbildung 12). Dieser Unterschied könnte für minimale Abweichungen der Lichtkurve sorgen. Dennoch würde er nicht das nichtvorhandene Hotspot bei meiner Lichtkurve erklären.

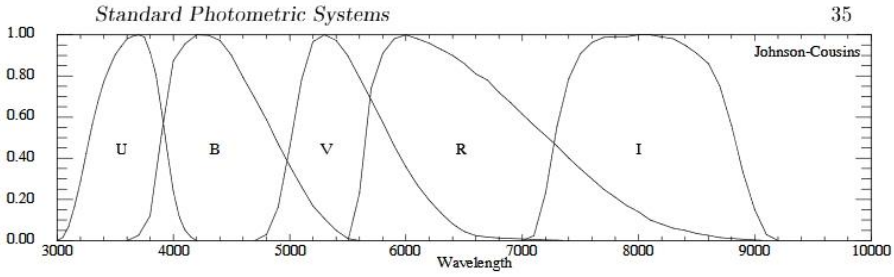


Abbildung 39: Transmissionskurven der Filter im Johnson-Cousins System

Ein weiterer Unterschied lässt sich erkennen, wenn man die Lichtkurven aller Farbfilter in ein Diagramm aufträgt und als Referenzstern den 2MASS J11430952+5451510 auswählt. Wie bereits erklärt, habe sowohl ich diesen Stern gewählt als auch Gürol und Michel in ihrer Arbeit. Bei meiner Lichtkurve mit allen Farbfiltern liegen alle drei Filterkurven auf einer Kurve (Abbildung 36). In der Lichtkurve der Profiastronomen hingegen liegen die drei Filterkurven übereinander, wie es in der Regel auch der Fall ist. Da sie aber denselben Referenzstern genutzt haben, müssten sie eigentlich eine Lichtkurve zeigen, die sich meiner ähnelt. Dennoch ist eine klare Trennung der drei Kurven zu erkennen (Abbildung 40).

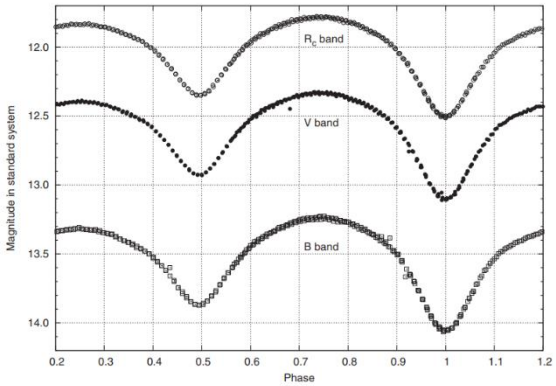


Abbildung 40: Gürols und Michels Lichtkurven mit allen drei Filtern des Doppelsterns NSVS 2607629 mit dem Referenzstern 2MASS J11430952+5451510

8.3. Fehlerdiskussion

Auch wenn meine Periode sich mit der von den Profiastronomen Gürol und Michel schon ähnelt, bleibt die Frage, warum es dennoch einen ungefähr 21,3 Sekunden langen Unterschied gab. Es könnte einige Gründe für diese Abweichung geben. Diese habe ich hier nun aufgelistet.

1. **Bildfehler durch Wetterbedingungen**
   Da der Wind am Abend der Aufnahme sehr stark war, waren einige Bilder nicht benutzbar. Auch wenn diese aussortiert wurden, ist davon auszugehen, dass der Wind auch die Bilder (in einem geringen Maße) beeinflusst hat, die ich genutzt habe.

2. **Fehler durch das Filterrad**
   Da in der Nacht der Beobachtung das Filterrad nicht so funktioniert hat, wie es funktionieren sollte, konnte ich auch nicht drei Lichtkurven erstellen, wie ich es eigentlich geplant hatte. Doch aufgrund des Referenzsterns konnte zumindest eine vollständige Lichtkurven mit allen Filterfarben erstellt werden. Zudem konnte ich eine Lichtkurve des Grünfilters erstellen, da zufälligerweise von dieser Filterfarbe die meisten Bilder zu Stande gekommen sind. Dennoch weist diese Lichtkurve einige Lücken durch die Fehler des Filterrads auf.

3. **Fehler bei der Auswertung**
   Bei der Auswertung gibt es viele Schritte, wobei Fehler entstehen können. Einerseits kann es vorkommen, dass ein genutztes Programm zur Auswertung, Daten unzureichend rundet. Beispielsweise kann es sein, dass die Ausgleichskurve, welche durch die beiden Minima von *Excel* gelegt wurde, nur minimal falsch angelegt wurde. Nur ein sehr geringer Unterschied hätte genug Auswirkungen den Wert der Periode zu verändern, welche wiederum Auswirkungen auf die gesamte Berechnung der Parameter hätte. Andererseits ist es möglich, dass ich eine Einstellung falsch getroffen habe oder Fehler in Berechnung gemacht habe.

Es ist durchaus möglich, dass es noch weitere Fehlerquellen gibt, welche das Ergebnis verfälscht haben könnten. Dennoch soll nicht unerwähnt bleiben, dass die erzielten Ergebnisse recht nah an die der Profiastronomen herankommen und auch die Lichtkurve zu einem guten und vergleichbaren Ergebnis gelangt ist. Abschließend kann ich daher sagen, dass der Projektkurs Astronomie mir viel Freude bereitet hat und für mich ein Erfolg in meiner schulischen Laufbahn ist.

9. Ausblick

Ich plane meine Untersuchungen des Doppelsterns NSVS 2607629 fortzusetzen. Dazu möchte ich erneut einen kompletten Umlauf aufnehmen und auswerten. Dabei soll der Fokus nur auf dem Grünfilter liegen, da das menschliche Auge bei dieser Farbe am meisten gereizt wird und ich so näher an die visuelle Helligkeit herankomme. Einen besonderen Blick lege ich auf eine mögliche Veränderung des Sternsystems im zweiten Maximum. Ich möchte herausfinden, ob bei einer erneuten Beobachtung ebenfalls kein Hotspot zu erkennen ist, wie ich es bereits in der Lichtkurve dieser Arbeit erkannt habe, obwohl ein solches Hotspot im Jahr 2016 bei den Profiastronomen Gürol und Michel zu erkennen war. Falls sich bestätigen sollte, dass der Doppelstern sich verändert hat, werde ich auch versuchen einen möglichen Grund dafür auszumachen. Gleichzeitig möchte ich versuchen weitere Systemparameter mit einer Modellrechnung zu errechnen. Dies soll im Rahmen einer Arbeit des Wettbewerbes „Jugend forscht“ geschehen. Ebenfalls strebe ich eine damit verbundene besondere Lernleistung in meinem Abitur 2022 an.

10. Anhang

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Doppelstern HIC 59206 3
- https://www.eso.org/public/germany/images/eso0313c/

Abbildung 2: NSVS 2607629 im Sternbild Ursa Majoris 4
Abbildung 3: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Maximum 6
- https://www.eso.org/public/germany/videos/eso1311b/; Sekunde: 0:03

Abbildung 4: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Hauptminimum 6
- https://www.eso.org/public/germany/videos/eso1311b/; Sekunde: 0:05

Abbildung 5: Modellhafte Lichtkurve eines Doppelsterns im Nebenminimum 7
- https://www.eso.org/public/germany/videos/eso1311b/; Sekunde: 0:10

Abbildung 6: Das Kontaktsystem NSVS 2607629 im Modell; Grafik: Gürol und Michel 8
- (PDF) BVR photometric study of NSVS 2607629. A high mass-ratio W-type W UMa system (researchgate.net); Gürol und Michel; Fig. 8

Abbildung 7: Sonne und Planet kreisen um einen gemeinsamen Schwerpunkt S 9
Abbildung 8: Das Hauptteleskop C14 Edge HD mit weiterem Equipment; Foto: Bernd Koch 12
Abbildung 9: Skizze eines Schmidt-Cassegrain Teleskop im inneren des Tubus; Grafik: Szőcs Tamás Tamasflex 13
- Datei:Schmidt-Cassegrain.png – Wikipedia; Szőcs Tamás Tamasflex; keine Bearbeitung vorgenommen

Abbildung 10: Der 130/780 Refraktor auf dem Rücken des C14 Edge HD; Foto: Bernd Koch 14
Abbildung 11: Die Hauptkamera STF-8300M mit dem Filterrad FW-8 hinter dem C14 Edge HD; Foto: Bernd Koch 15
Abbildung 12: Transmissionskurven der Baader L-RGB-C CCD-Filter 17
- https://www.baader-planetarium.com/de/blog/die-baader-l-rgb-c-ccd-filter/

Abbildung 13: Die Nachführkamera Celestron NextImage Burst M 17
Abbildung 14: Der experimentelle Aufbau am Tag 19
Abbildung 15: Der Aufbau in der Nacht in der Vertikalen 20
Abbildung 16: Der Aufbau in der Nacht in der Horizontalen 20
Abbildung 17: Schirm der Ansteuerung und Fokussierung 21
Abbildung 18: Aufnahme eines Bildes 22
Abbildung 19: Kalibrierung aller Darks und Flats 23
Abbildung 20: Vorbereitung der Kalibrierung aller Darks und Flats 23
Abbildung 21: Kamera-Einstellungen 24
Abbildung 22: Einstellungen zur Sternerfassung 24
Abbildung 23: Einstellungen zur Sternüberlagerung 24

Abbildung 24: Photometrische Einstellungen 24
Abbildung 25: Der fertige Datensatz in Muniwin 25
Abbildung 26: Einstellungen der Lichtkurve 26
Abbildung 27: Auswahl des Referenzsterns und der „Check“-Sterne 26
Abbildung 28: Rekonstruktion der Aufnahme in Stellarium mit Veränderlichem und Referenzstern 27
Abbildung 29: Erste Lichtkurve des Sterns NSVS 2607629 zum Vergleichsstern 2MASS J11430952+5451510 mit aufsummierten RGB-Helligkeiten 27
Abbildung 30: Lichtkurve des Doppelsterns zum elften „Check"-Stern 28
Abbildung 31: Excel Tabelle mit übertragenden Werten aus Muniwin 29
Abbildung 32: Auswertung Nebenminimum 30
Abbildung 33: Auswertung Hauptminimum 30
Abbildung 34: Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit RGB Helligkeiten 31
Abbildung 35: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 im Grünfilter 31
Abbildung 36: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit RGB-Helligkeiten; aufgetragen ist die Phase (x-Achse) und der Fluss (y-Achse) 33
Abbildung 37: Die Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 mit dem Grünfilter; aufgetragen ist die Phase (x-Achse) und der Fluss (y-Achse) 33
Abbildung 38: Gürols und Michels Lichtkurve des Doppelsterns NSVS 2607629 37

- (PDF) BVR photometric study of NSVS 2607629. A high mass-ratio W-type W UMa system (researchgate.net); Gürol und Michel; Fig. 5

Abbildung 39: Transmissionskurven der Filter im Johnson-Cousins System 38

- Standard Photometric System, Michael S. Bessell, S. 35; araapaper_rev.dvi (anu.edu.au)

Abbildung 40: Gürols und Michels Lichtkurven mit allen drei Filtern des Doppelsterns NSVS 2607629 mit dem Referenzstern 2MASS J11430952+5451510 38

- (PDF) BVR photometric study of NSVS 2607629. A high mass-ratio W-type W UMa system (researchgate.net); Gürol und Michel; Fig. 2

Abbildung 41: Der Autor (Noah Felix Baum) 44

Alle Abbildungen, die ohne Quellenangabe stehen, sind eigen angefertigte Skizzen, Bilder oder gemachte Screenshots.

10.2. Softwareverzeichnis

AnyDesk (5. Experimenteller Aufbau): https://anydesk.com/de/downloads/windows

Excel (7.3. Lichtkurvenerstellung mit Periodenberechnung): https://www.microsoft.com/de-de/microsoft-365/excel

MaxIm DL (6. Durchführung der Beobachtung; 7.1. Kalibrierung und Registrierung der Aufnahmen): https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/

Muniwin (7.2. Übertragung und Darstellung in Muniwin): https://sourceforge.net/projects/c-munipack/

SpecTrack (4.7. Die Autoguiding Software Spec Track): https://www.baader-planetarium.com/de/spectrack-autoguiding-software-f%C3%BCr-sternspektroskopie.html

Stellarium (3.1. Das Doppelsternsystem NSVS 2607629; 6. Durchführung der Beobachtung; 7.2. Übertragung und Darstellung in Muniwin): https://stellarium.org/de/

10.3. Danksagung

Abschließend möchte ich mich noch bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit in irgendeiner Form unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei der Schule und den zahlreichen Sponsoren für diese Möglichkeit bedanken, dass ich überhaupt an diesem Projektkurs teilnehmen konnte und ich diese Arbeit schreiben konnte. Ansonsten hätte ich nicht so einen großen und tiefen Einblick in die Astronomie und deren Forschung erlangt.

Mein größter Dank geht aber an meinen Kursleiter Bernd Koch, da er mich in allen Phasen des Projektkurses unterstützt und begleitet hat. Seit der Themenfindung hat er mir jede Frage beantwortet und er hat mir bei den Vorbereitungen, der Durchführung und der Auswertung der Beobachtung geholfen. Ganz besonders bin ich ihm dankbar, dass er trotz der angespannten Covid-19 Pandemie im Winter 2020/2021 mit mir die Untersuchung des Doppelsterns an seiner privaten Sternwarte per Fernsteuerung ermöglicht hat.

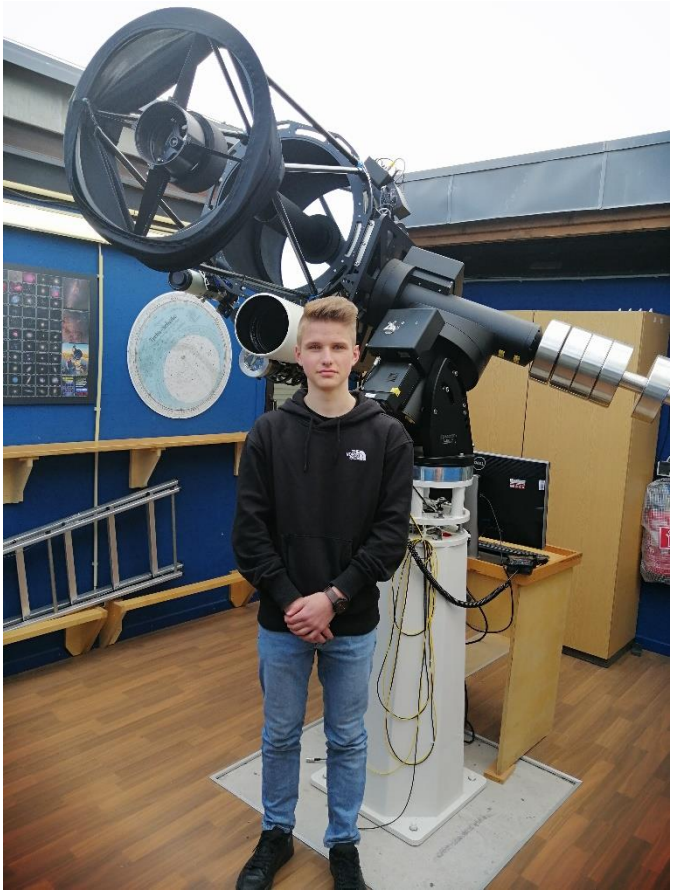


Abbildung 41: Der Autor (Noah Felix Baum)

10.4. Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Projektarbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir verfasste Projektarbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Wuppertal, 18.05.2021, Noah Felix Baum