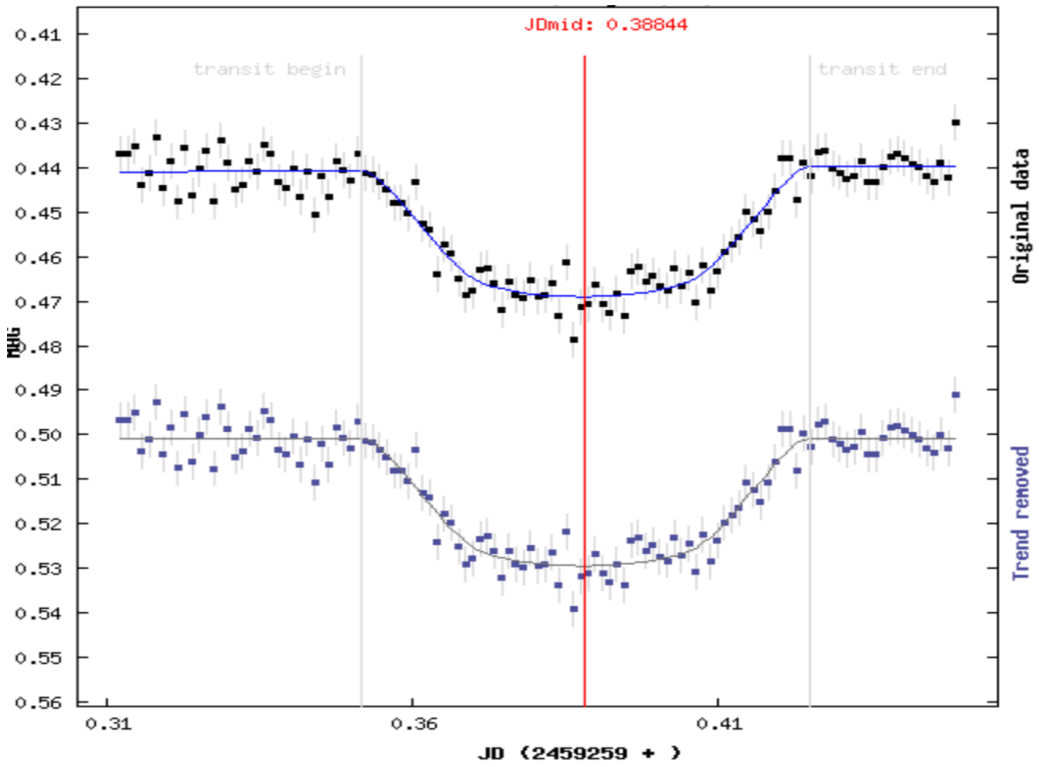
Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie 2020/2021

am Schülerlabor Astronomie des CFG Wuppertal

Nachweis des Exoplaneten

HAT-P-54b



Linus Paul Nothdurft
Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Jahrgangsstufe Q1

Kursleitung: Bernd Koch
Abgabedatum: 19.05.2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 3

1.1 Motivation 3

1.2 Grundlegende Informationen 4

2 Geschichtlicher Hintergrund 5

2.1 Erste Entdeckung eines Exoplaneten 5

2.2 Die Kepler-Mission 5

2.3 K2-Mission 7

3 Methoden zur Erfassung von Exoplaneten 8

3.1 Transitmethode 8

3.2 Radialgeschwindigkeitsmethode 9

3.3 Direkte Beobachtung 10

3.4 Microlensing 11

4 Grundlagen der Beobachtung 12

4.1 Equipment der Beobachtung 12

4.2 Vorbereitungen zur Beobachtung 13

4.3 Verwendete Computerprogramme 14

5 Durchführung der Beobachtung 16

5.1 Voreinstellungen 16

5.2 Aufnehmen von Darkframes 16

5.3 Aufnehmen von Flatfields 17

5.4 Kalibrierung der Aufnahmen 18

6 Aufbereitung der Aufnahmen 19

6.1 Erstellen einer Lichtkurve 19

7 Berechnungen der Exoplanetenparameter 23

7.1 Parameter des Exoplanetentransits 23

7.2 Theoretische Grundlagen zum Planetentransit 24

7.3 Herleitung und Berechnung der Parameter 25

7.3.1 Differenz der Strahlungsleistung 25

7.3.2 Tiefe der Bedeckung 26

7.3.3 Bahnneigung 28

7.3.4 Impact Parameter 30

7.3.5 Dauer der Bedeckung 31

7.4 Vergleich der gemessenen Parameter 34

8 Anhang 35

8.1 Abbildungsverzeichnis 35

8.2 Softwareverzeichnis 36

8.3 Danksagung 37

8.4 Abschlusserklärung 38

1 Einführung

Unser Universum ist eine sehr komplexe und höchst interessante Struktur, die in der Vergangenheit vielen Menschen die Möglichkeit gab, den Wissensstand über die Entstehung der Erde sowie die Zusammensetzung des Weltraums zu verbessern.
Auch wenn die Vorstellungen und Spekulationen über das Sonnensystem, den Nachthimmel und das Weltall damals von Volk zu Volk unterschiedlich waren, erkannten schon einige Beobachter und Wissenschaftler der Antike sich wiederholende Zyklen am Nachthimmel und gaben den Formen und Bildern Namen. Außerdem realisierten sie, dass das Erscheinen dieser Sternbilder mit den Jahreszeiten zusammenhing und integrierten diese in ihre Kalender.
Außerdem konnten Beobachtungen von Sternen und Planeten schon vor Jahrhunderten die Erkenntnis bringen, dass die Erde nicht der Mittelpunkt unseres Sonnensystems ist und somit alle bis dato bekannten Planeten und Sternbilder in einem sich wiederholenden Zyklus um die Sonne kreisen. Schon damals fragte man sich, ob diese Planeten die einzigen in unserem Sonnensystem seien und ob nicht auf manchen dieser zahlreichen Sterne am Nachthimmel Leben existierte.

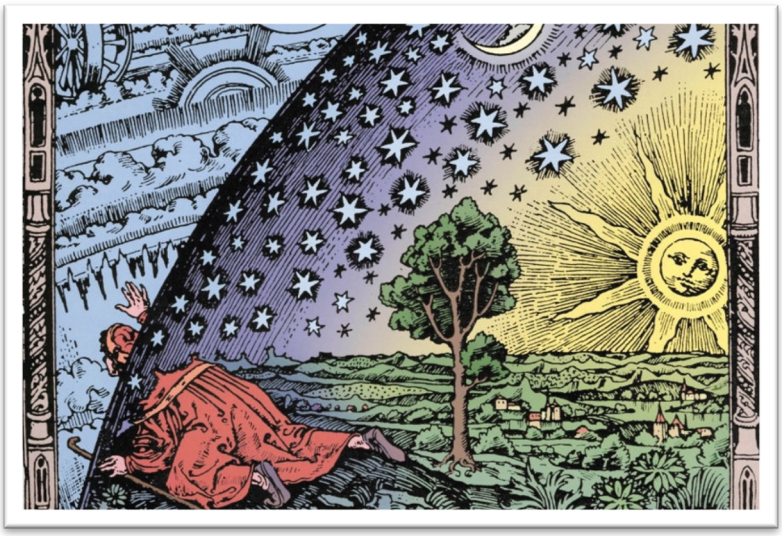


Abbildung 1: Frühere Vorstellung unseres Sonnensystems; Quelle: http://www.bpb.de/ (Geschichte der Weltbilder)

Diese Frage gab Anlass zu diversen Spekulationen und gab vielen Menschen sowie Astronomen den Anreiz, abstruse Geschichten zu erfinden, jedoch konnten erst in den letzten Jahrzehnten erste Antworten gefunden werden, um diese Theorien zu widerlegen.

1.1 Motivation

Da mich diese Frage sehr beschäftigt und ich mich unter allen Himmelskörpern für die Exoplaneten am meisten interessiere, habe ich mich dazu entschieden, meine Projektarbeit über Exoplaneten zu schreiben. Der Exoplanet HAT-P-54b eignet sich perfekt für mein Projekt, da er zu der Zeit der Messung optimal am Himmel stand und somit eine uneingeschränkte und genaue Beobachtung ermöglichte.
In dieser Projektarbeit möchte ich mich mithilfe von Beobachtungen den Berechnungen der Parameter des Exoplaneten HAT-P-54b widmen und möchte mich mit dem Thema Exoplaneten näher auseinandersetzen.
Dementsprechend werde ich zuerst die geschichtliche Entwicklung der Wissenschaft über Exoplaneten näher beleuchten. Dazu werde ich sowohl die erste Entdeckung eines extrasolaren Planeten als auch die wichtigsten Missionen, ihre Ziele und den Beitrag zur Wissenschaft erläutern.

Danach werde ich diverse Methoden zur Entdeckung von Exoplaneten erklären und analysieren und im Zuge dessen meine persönliche Beobachtung ausarbeiten und den Exoplaneten lokalisieren und mithilfe der Helligkeitsabweichung und weiteren Erkenntnissen charakterisieren. Dabei werde ich außerdem die Eigenschaften dieses Exoplaneten durch eigene Berechnungen analysieren.

1.2 Grundlegende Informationen

Ein Exoplanet, Wortzusammensetzung aus altgriechisch ἔξω („exō“ = außerhalb) und πλανήτης („planētēs“ = Umherirren), auch extrasolarer Planet, ist ein Planet außerhalb unseres Sonnensystems, der sich in einem gravitativen Einfluss zu einem Stern befindet. Somit befinden sich Exoplaneten nicht auf der Umlaufbahn unserer Sonne, sondern gehören zu einem anderen Planetensystem und umkreisen dort Sterne oder braune Zwerge. Exoplaneten gehören zur Gattung der planetarischen Himmelskörper.
Exoplaneten können mithilfe verschiedener Methoden nachgewiesen oder entdeckt werden. Außerdem ist die Wissenschaft heutzutage in der Lage durch diese Beobachtungen und Aufzeichnungen den Exoplaneten genau zu charakterisieren und ihn mit aus unserem Sonnensystem bekannten Planeten zu vergleichen.
Das Besondere an Exoplaneten ist, dass manche von Ihnen in einem ähnlichen Verhältnis zu ihrem Mutterstern stehen, wie die Erde zur Sonne. Somit sind in den letzten Jahren vermehrt extrasolare Planeten entdeckt worden, auf denen ähnliche klimatische und athmosphärische Bedingungen herrschen wie auf der Erde und die somit die Frage aufwerfen, ob es möglich ist, dass es dort Leben gibt. Die Erforschung dieser Planeten lässt vermuten, dass möglicherweise einige Exemplare auch Eigenschaften aufweisen, die ein menschliches Überleben ermöglichen könnten.[1]
Falls ein Exoplanet in einem bestimmten Abstand zu seinem Fixstern steht, sodass Wasser in flüssiger Form auf diesem existieren kann, so befindet er sich in der habitablen Zone, die auch „Grüne Zone“ oder „bewohnbare Zone“ genannt wird. Die Existenz von flüssigem Wasser ist die Voraussetzung für erdähnliches Leben auf dem Exoplaneten und hängt dementsprechend mit dessen Oberflächentemperatur zusammen.[2]

[1] https://praxistipps.focus.de/: zuletzt eingesehen am: 25.04.2021
[2] https://www.sterngucker.de/: zuletzt eingesehen am: 27.04.2021

2 Geschichtlicher Hintergrund

2.1 Erste Entdeckung eines Exoplaneten

Die Astronomen nahmen bis zu den 1990er Jahren an, dass die Planeten in unserem Sonnensystem die einzigen Planeten seien, die um einen Stern oder eine Sonne kreisten. Am 6. Oktober 1995 wurde jedoch vom Schweizer Astronomen Michel Mayor und seinem Mitarbeiter Didier Queloz im Rahmen eines Forschungsprojekts im Haute-Provence-Observatorium in Südostfrankreich im Auftrag des Departments für Astronomie der Universität Genf auf einer Konferenz in Florenz die Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten „51 Pegasi b“ oder auch „Dimidium“ bekanntgegeben, der um den Fixstern „51 Pegasi“, auch Helvetios, im Sternbild Pegasus kreist. Dieser sonnenähnliche Stern, der zu der Gattung der Hauptreihensterne gehört, hat eine Masse von 1.11 ($\pm$ 0.06) M_{Sun}, einen Radius von 1.266 ($\pm$ 0.046) R_{Sun} und eine Oberflächentemperatur von 5520 ($\pm$ 203.15) °C und ist somit etwas kälter und etwas größer als unsere Sonne. Dahingegen hat der Exoplanet 51 Pegasi b eine Entfernung von 14.7 pc bzw. 48 Lichtjahren zur Erde und eine Masse von 0.47 M_J, sodass er mit einer Umlaufzeit von 4.2308 $\pm$ 0.00004 Tagen seinen Fixstern umkreist. Der Exoplanet wurde durch die Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt.

2.2 Die Kepler-Mission

Die Kepler-Mission beschreibt ein Projekt der NASA im Jahre 2009, bei dem mithilfe des Kepler-Weltraumteleskops neue Exoplaneten entdeckt werden sollten. Nach Ausfall zweier Reaktionsräder gab es eine weitere Mission mit dem Grundgerüst des ursprünglichen Teleskops namens K2-Mission. Benannt waren beide Missionen nach dem deutschen Physiker und Astronom Johannes Kepler, der schon Anfang des 17. Jahrhunderts die Gesetzmäßigkeiten zwischen den Planeten unseres Sonnensystems und der Sonne erkannte und das Fundament für die Erforschung von Exoplaneten mit den **Keplerschen Gesetzen** legte.

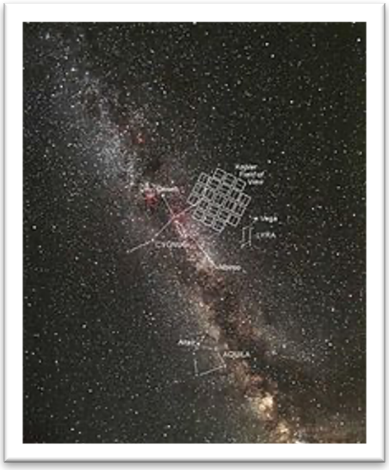


Abbildung 2: Sternbild, in dem die Kepler-Mission durchgeführt wurde; Quelle: http://www.wikipedia.de/ (Kepler-Mission)

Ziel der Kepler-Mission war es, habitable, extrasolare Planeten in einem Sichtfeld von 190.000 Sternen primär im Sternbild „Schwan” zu finden. Dabei wurden außerdem neue Informationen zu variablen Sternen mit sehr kurzen Periodenzeiten gesammelt.

Die Sonde „Kepler” wurde auf die Umlaufbahn der Sonne gelenkt, hatte somit eine Umlaufzeit von 372,5 Tagen und entfernte sich stetig von der Erde, damit unser Planet die Beobachtungen der Exoplaneten nicht behindert. Nachdem das Teleskop am 09.03.2009 mit einer Delta-Rakete gestartet wurde, brauchte es zwei weitere Monate, um sich so entsprechend zu kalibrieren und einzurichten, dass es möglichst genaue Informationen und Messungen durchführen konnte. Knapp ein Jahr später verkündete die NASA im Januar des Jahres 2010 die Entdeckung fünf neuer Exoplaneten, die mithilfe dieses Teleskops beobachtet werden konnten. Die Exoplaneten Kepler-1b bis 3b konnten zwar vorher bereits geortet werden,

zumal sie ihre Sterne mit einer Distanz von weniger als 0,1 AE umkreisen und eine derart hohe Oberflächentemperatur aufweisen, wie sie kein anderer Planet unseres Sonnensystems hat und deswegen den Forschern zu dem Zeitpunkt nicht unbekannt waren. Der nächstgrößte Meilenstein in der Erforschung von Exoplaneten mit dem Kepler-Weltraumteleskop war die Entdeckung des bis dato kleinsten Gesteinsplaneten Kepler-10b, die im Januar 2011 bekannt gegeben wurde. Er ist etwa 1,47-mal so groß wie die Erde, weist das 3,72-fache ihrer Größe auf und umkreist den sonnenähnlichen Stern Kepler-10, der 560 Lichtjahre von unserem Sonnensystem entfernt ist, im Sternbild „Drache".
Am 2. Februar 2011 zog die NASA eine Zwischenbilanz der Keplermission und berichtete, dass innerhalb der knapp zwei Jahre 1235 neue potentielle Exoplaneten entdeckt worden sind, wobei davon 5 einen erdähnlichen Charakter haben, also vergleichbar groß sind, und sich in der habitablen Zone des Beobachtungsfeldes befinden. Insgesamt wurden 54 Planeten in der habitablen Zone und weitere 68 erdgroße Planeten vom Kepler-Teleskop erfasst. Erdähnliche Planeten konnten durch eine Abdunkelung der Größenordnung von 0,1‰ am Kepler-Teleskop während ihres Durchgangs vor einem Stern erkannt werden. Mithilfe der Keplerschen Gesetze und der Messungen des Fotometers des Kepler-Weltraumteleskops bezüglich der Helligkeitsdifferenz der Planeten und deren Umlaufzeit konnten sowohl die Umlaufbahn als auch die Größe des Planeten recht genau bestimmt werden. Die neu ermittelte Entfernung zwischen Exoplanet und seiner Sonne und deren Leuchtkraft ermöglichte es, die ungefähre Temperatur auf dem extrasolaren Planeten zu bestimmen und ihn dementsprechend als bewohnbar zu kennzeichnen.
Am 5.12.2011 verzeichnete die NASA einen ersten extrasolaren Planeten, der sich im Gegensatz zu den vorher entdeckten Planeten in der habitablen Zone eines sonnenähnlichen Sterns befindet, die den Abstand zwischen zwei Himmelskörpern bezeichnet, in dem die Voraussetzungen für dauerhaft bestehendes Wasser und den damit verbundenen Lebensorganismen gegeben sind.
Im Sommer des Jahres 2012 fiel eines der vier Reaktionsräder der Sonde, die für die Lageregelung und die Stabilisierung zuständig waren, aus. Ein halbes Jahr später erkannte man an einem weiteren Reaktionsrad eine Reibung, die das Aus für die Mission bedeutet hätte, falls das Rad ausgefallen wäre. Daraufhin wurde am 17. Januar 2013 der „wheel rest safe mode" am Teleskop aktiviert, sodass das Teleskop nach 10 Tagen wieder reibungslos funktionierte und weitere Daten sammeln konnte. Kurz darauf entdeckte man den bis heute kleinsten Exoplaneten Kepler-37b, der mit einem Durchmesser von etwa 3900 km, der sich mithilfe der Asteroseismologie ziemlich genau bestimmen lässt und nur minimal größer als der Erdmond ist. Er befindet sich im System Kepler-37 im Sternbild „Leier", ist etwa 210 Lichtjahre von der Erde entfernt und ähnelt in der Größe unserer Sonne.
Ihr endgültiges Ende erfuhr die Kepler-Mission im August 2013, nachdem am 13. Mai des gleichen Jahres ein weiteres Reaktionsrad ausgefallen war und das Weltraumteleskop nicht mehr genügend stabilisiert werden konnte.

2.3 K2-Mission

Im Rahmen dieses Ausfalls wurde die K2-Mission ins Leben gerufen, die mit den zwei verbliebenen Rädern weiterhin Daten sammeln sollte und somit ein komplett neues Konzept für den Betrieb von Raumfahrzeugen darstellte. Neben der Entdeckung von neuen Exoplaneten sollte die veränderte Raumsonde nun auch bestimmte Teile des Weltraums nach Supernovae, Sternhaufen, aktiven Galaxien und anderen Sternen durchsuchen. Mithilfe der Transitmethode, die Helligkeitsveränderungen festhält und somit Daten zur Charakterisierung der Exoplaneten sammelt, beobachtete das Weltraumteleskop verschiedene Felder um die Ekliptik, also die Ebene, auf der alle Planeten unseres Sonnensystems liegen. So konnte auch der am weitesten von der Erde entfernte Planet Neptun von November 2014 bis Januar 2015 erforscht werden.
Die erste wichtige Entdeckung der K2-Mission war die des Exoplaneten „Kepler-186f“, der etwa 492 Lichtjahre von der Erde entfernt liegt und seinen Mutterstern - den Roten Zwerg Kepler-186 - mit einem Abstand von 52 Mio. km mit einer Umlaufzeit von 130 Tagen umkreist. **Kepler-186f** ist der erste Exoplanet, der in der habitablen Zone seines Muttersterns liegt und es ist anzunehmen, dass dieser Exoplanet mit einem Radius von etwa 1,11 Erdradien wie die Erde ein Gesteinsplanet ist[3].
Ein weiterer Meilenstein bei der Erforschung von Exoplaneten war die Entdeckung der ersten Mega-Erde Kepler-10c, die im Namen der K2-Mission entdeckt werden konnte. Hierbei handelt es sich um einen Exoplaneten mit einer Masse von 17 Erdradien und einem Radius von knapp über zwei Erdradien. Aufgrund dieser Zusammensetzung hat dieser Himmelskörper eine extrem hohe Dichte, weshalb er seinen Zentralstern Kepler-10 trotz der geringen Entfernung von nur 0.241 Astronomischen Einheiten ziemlich schnell mit einer Umlaufdauer von 45.3 Tagen umkreist.

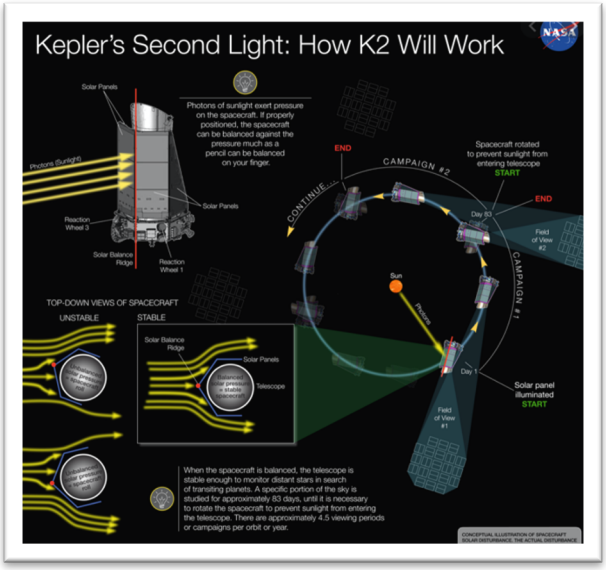


Abbildung 3: Ausrichtung des Teleskops der K2-Mission; Quelle: http://www.nasa.gov/ (K2-Mission)

[3] http://exoplanet.eu/: zuletzt eingesehen am: 13.05.2021

3 Methoden zur Erfassung von Exoplaneten

3.1 Transitmethode

Die Transitmethode ist das am häufigsten verwendete Verfahren zur Entdeckung von Exoplaneten. Mithilfe dieses photometrischen Prozesses sind im Rahmen der Kepler-Mission, der daraus resultierenden K2-Mission und anderer Beobachtungen etwa 80% aller bisher bekannten Exoplaneten erfasst und erforscht worden.
Die Transitmethode misst die Abweichung der Helligkeit des Zentralsterns, während der Exoplanet sich vor diesen Stern schiebt und es zu einem Planetentransit kommt. Dazu muss jedoch der Transit in derselben Ebene geschehen, in der sich die Erde zu diesem Stern befindet, damit der Exoplanet während des Umlaufs zu einem Zeitpunkt zentral vor dem Stern steht und später dementsprechend genau dahinter und somit die Intensität des Zentralsterns von der Erde aus abnimmt. Das ist für die Messung mithilfe der Transitmethode notwendig, damit die eigentliche Intensität des Fixsterns nicht durch den Exoplaneten beeinflusst wird.[4] Der Intensitätsunterschied lässt sich erfassen, indem man während der Beobachtung die Helligkeit von benachbarten Vergleichssternen misst, die keinen Planetentransit durchlaufen, sondern in ihrer Helligkeit konstant sind. Anhand dieser Messungen, die von einem Computerprogramm durchgeführt werden, kann man den Helligkeitsunterschied bestimmen.
Mithilfe der Ergebnisse dieser Methode zur Entdeckung von Exoplaneten lassen sich Rückschlüsse auf die Charakteristika des Zentralsterns, des Exoplaneten und des Transits ziehen. So kann man durch den Graphen, der sich aus der Beobachtung ergibt, anhand der x-Achse die Dauer des Transits ablesen. Wenn man einen Exoplaneten etwas länger beobachtet, so erkennt man, dass es neben dem Zeitpunkt, zu dem er sich vor den Stern schiebt, eine weitere Intensitätsabweichung gibt, sobald der Exoplanet sich hinter dem Fixstern befindet. Zu diesem Zeitpunkt hat der Exoplanet nun eine halbe Umrundung seines Muttersterns vollzogen, sodass die Differenz zwischen den Intensitätsunterschieden die Hälfte der Umlaufzeit beträgt.
Des Weiteren lassen sich durch die Messung die Flächenverhältnisse zwischen dem Exoplaneten und seinem Fixstern ausrechnen, wobei diese auch Rückschlüsse auf die Radien beider Himmelskörper zulassen.

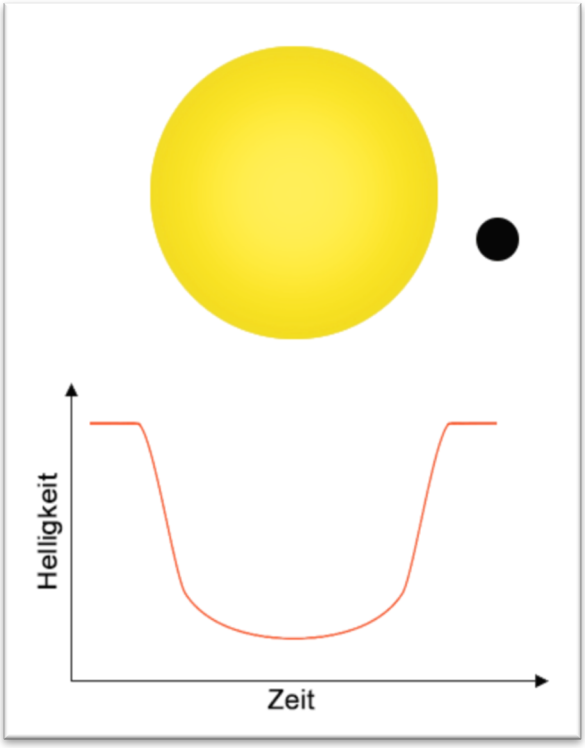


Abbildung 4: Durch die Transitmethode aufgenommene Lichtkurve; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Transitmethode)

[4] https://beltoforion.de/: zuletzt eingesehen am: 25.04.2021

3.2 Radialgeschwindigkeitsmethode

Bei dieser Methode, die zu den frühesten Methoden zur Entdeckung von Exoplaneten zählt und zugleich das bisher erfolgreichste Verfahren auf diesem Gebiet der Astronomie ist, nimmt der Spektrograph höchst detaillierte Spektren des zu beobachtenden Sterns auf. Da der Stern nun eine Gravitationwechselwirkung zum Exoplaneten hat, kreisen beide Himmelskörper auf unterschiedlichen Bahnen aber auf derselben Ebene umeinander und bilden dabei ein gemeinsames Massezentrum (Baryzentrum). Gerade Exoplaneten mit einer hohen Masse haben so einen hohen und zugleich messbaren Einfluss auf ihren Zentralstern.
Dabei ist die Bahn des Exoplaneten wesentlich größer als die des Sterns, da der extrasolare Planet nur einen Bruchteil der Masse des Muttersterns aufweist.
Die dabei vollzogene periodische Bewegung des Sterns ist die Geschwindigkeitskomponente entlang einer Sichtlinie zwischen der Erde und dem Stern, die Radialgeschwindigkeit genannt wird.
Allgemein hat zwar jedes astronomische Objekt eine Radialgeschwindigkeit zur Erde, da kein Objekt im Kosmos stillsteht. Jedoch lässt sich gerade diese Radialgeschwindigkeit ziemlich genau bestimmen, zumal sich nur selten die Laufbahnen und Einflüsse der zu beobachtenden Objekte ändern. Falls die Sterne nun nicht in einem gravitativen Einfluss zu einem Exoplaneten stehen, so weisen sie nach Abzug ihrer „normalen“ Radialgeschwindigkeit keine weitere Bewegung auf. Wenn jedoch ein Schwerpunkt vorliegt, der aus der Gravitation zu einem Exoplaneten resultiert, bewegt sich der Fixstern entweder mit einer negativen Radialgeschwindigkeit, also in Richtung der Erde, oder mit einer positiven Radialgeschwindigkeit auf die Erde zu. Dadurch entstehen Geschwindigkeitsveränderungen, die eine Berechnung der Masse des Sterns und des dazugehörigen Exoplaneten ermöglichen.[5]
Durch die aufgenommenen Spektren lässt sich so eine Blau- und Rotverschiebung feststellen, die der Beweis dafür sind, dass sich das Verhältnis zwischen der Wellenlängenänderung und der vorher bestimmten Wellenlängen verändert. Eine Rot- bzw. Blauverschiebung, auch Doppler-Effekt genannt, lässt sich durch die molekulare und atomare Untersuchung der Spektrallinien von Emissionen oder Absorptionen erkennen.

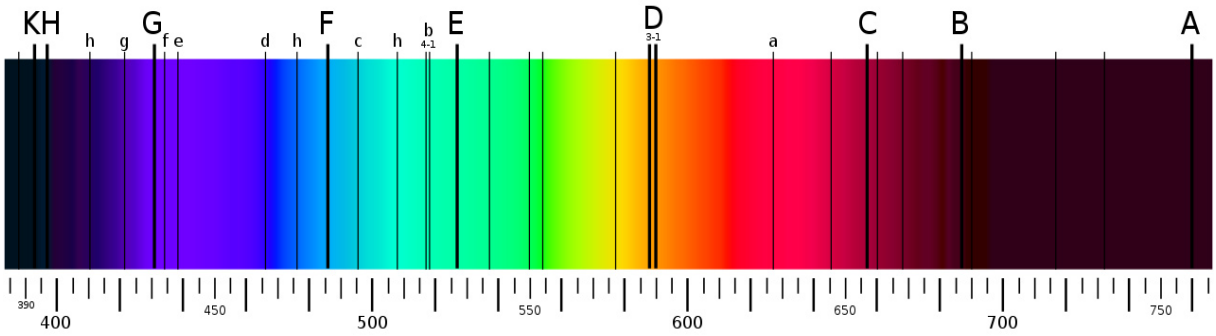


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung eines Spektrums, hier: Frauenhoferlinien – Absorptionslinien im Spektrum der Sonne; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Frauenhoferlinien)

[5] https://lp.uni-goettingen.de/: zuletzt eingesehen am: 14.05.2021

3.3 Direkte Beobachtung

Die direkte Beobachtung eines Exoplaneten ist mit unseren aktuellen technischen Möglichkeiten zwar nicht unmöglich, jedoch ist sie nur mit großen Weltraumteleskopen wie dem NASA/ESA Hubble-Weltraumteleskop oder auf der Erde stationierten Observatorien wie dem VLT (Very Large Telescope) realisierbar, da die meisten Exoplaneten sich in einem zu großen Abstand zu ihrem Fixstern befinden, um mit der nötigen Intensität beleuchtet zu werden, damit jene Teleskope ihre Existenz erfassen können. Ein weiteres Problem dieser selten verwendeten Methode ist auch die schwache Intensität vieler Himmelskörper, die prinzipiell zu schwach leuchten, um den Exoplaneten für unsere Weltraumteleskope sichtbar zu machen. Jedoch ist es durchaus möglich durch Wärmespektren derartig schwach leuchtende Exoplaneten ausfindig zu machen, solange die abgestrahlte Infrarotstrahlung stark genug ist. Dafür ist es jedoch notwendig, dass der Exoplanet weniger als 600 Lichtjahre von der Erde entfernt ist, wobei die meisten Exoplaneten einen Abstand von weniger als 200 Lichtjahren zur Erde haben.

Abbildung 6: Polnisches 1.3 m Teleskop in der chilenischen Sternwarte „Las Campanas"; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Direkte Beobachtung)

Diese Methode zur direkten Beobachtung von Exoplaneten wird nur sporadisch und ausschließlich bei besonders hellen Objekten genutzt, weshalb auch nur 191 Exoplaneten mittels dieser Methode entdeckt wurden. Allerdings ermöglichte der fortschreitende Wissensstand in den letzten Jahren immer mehr Nachweise und neue Entdeckungen. So ist es Forschern im März 2019 erstmals gelungen, den Exoplaneten „HR 8799 e" mittels der optischen Interferometrie, also der Überlagerung aller Wellen, zu beobachten.[6] So konnte das Interferometer des VLT Observatoriums (VLTI – Very Large Telescope Astronomical Interferometer) alle zur Verfügung stehenden Komponenten nutzen, die zur Änderung der Überlagerung der Wellen dienten, wie beispielsweise die zur Änderung der überlagerten Lichtlängen oder die Abweichung der Abstände zwischen den Messinstrumenten der Gravitationswellendetektoren. Im Zuge dieses Versuchs wurden außerdem erstmals Spektren des Planetenlichts aufgenommen, sodass es den Forschern möglich war, die Beschaffenheit der Atmosphäre des Exoplaneten zu charakterisieren. Sie kamen zu dem Schluss, dass den Gasriese HR 8799e eine aus Eisen- und Silikatenwolken bestehende Atmosphäre umgibt, die aus einem ungewöhnlich hohen Anteil an Kohlenstoffmonoxid besteht, das sich durch um den Planeten herrschende Windeinflüsse nicht mit Wasserstoff zu Methan verbindet.

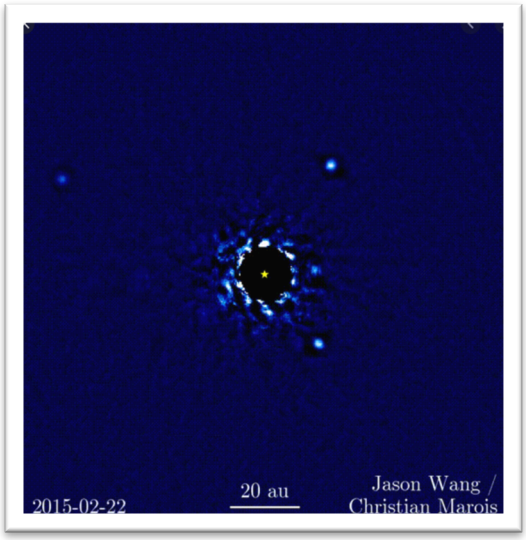


Abbildung 7: Aufgenommenes Bild durch die direkte Beobachtungsmethode; Quelle: http://www.beltoforion.de/ (Methoden zur Exoplanetenentdeckung – Direkte Beobachtung)

[6] https://de.wikipedia.org/, beobachtende Astronomie; zuletzt eingesehen am: 15.05.2021

3.4 Microlensing

Diese Methode zur Beobachtung von Exoplaneten wird zwar nur selten genutzt und es ist oftmals strittig, ob es sich bei den beobachteten Objekten tatsächlichen um Exoplaneten handelt, die in einem gravitativen Verhältnis zu einem Mutterstern stehen, jedoch konnten durch sie vereinzelte Exoplanetkandidaten entdeckt und teilweise nachgewiesen werden, die keine andere Entdeckungsmethode hätte verorten können.
Das „Microlensing“ oder „Mikrolinseneffekt“ misst den Helligkeitsunterschied eines Himmelsobjekts, der dadurch verstärkt wird, dass sich ein Objekt von Planeten- bis Sternmasse zwischen den Beobachtungspunkt und den **Hintergrundstern** schiebt.
Falls sich dieser **Vordergrundstern** im Einsteinradius zum Hintergrundstern befindet, so bewirkt die Masse dieses Sterns eine Ablenkung der Lichtstrahlen, die zu einer Konzentration der Strahlung und somit einer messbaren Verstärkung der Helligkeit auf der Erde führt.
Dieser Vorgang gemäß Einsteins Relativitätstheorie ist bedingt durch die elektromagnetische Strahlung, die ein Himmelsobjekt durch den gravitativen Einfluss der Galaxie aufweist. Der Einsteinradius oder auch Einsteinring beschreibt den Wirkungsbereich der elektromagnetischen Strahlung, in dem sich der Hintergrundstern befinden muss, sodass der Mikrolinseneffekt eintritt.

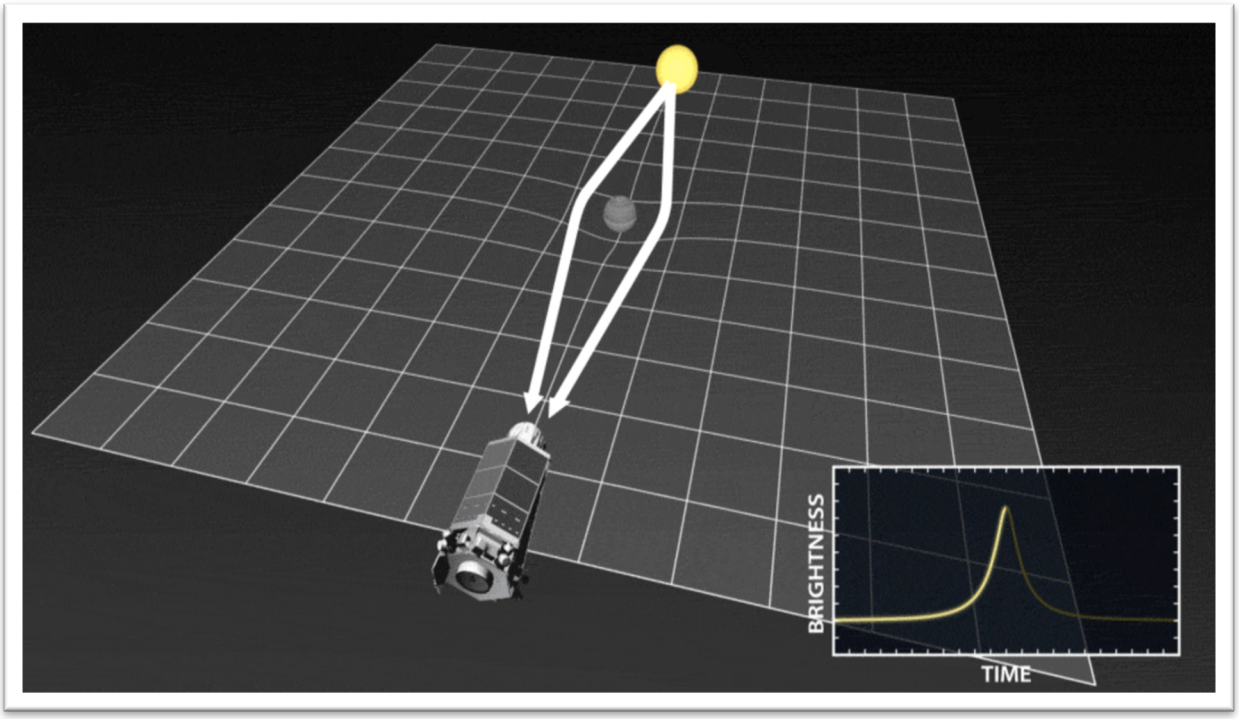


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der abgelenkten Lichtstrahlen bedingt durch den Exoplaneten; Quelle: http://www.commons.wikimedia.org/ (gravitational lens.gif)

4 Grundlagen zur Beobachtung

4.1 Equipment der Beobachtung

Wir haben die Beobachtung des Exoplaneten mit dem von unserem Fachlehrer, Herrn Koch, bereitgestellten Teleskop „Celestron 14 EdgeHD Schmidt-Cassegrain Teleskop“ gemacht. Das Teleskop hat eine Öffnung von 0,36 m und ein Öffnungsverhältnis von f/10.8. Durch einen Fokalreduktor haben wir die Brennweite auf 2700mm verkürzt, sodass das Öffnungsverhältnis f/7.6 betrug, was für unsere Beobachtung besser geeignet war. Die verwendete „SBIG STF-8300M Kamera“ liefert eine hohe Auflösung von 3326×2504 Pixel. Von weiterer Relevanz für eine gelungene Beobachtung ist die variable Belichtungszeit der Kamera, die sich mit einem Minimum von 0,1 Sekunden und einem Maximum von 60 Minuten perfekt für einen mehrstündigen, periodischen Gebrauch eignete. Durch den Sensortyp der Kamera, der mit dem CCD-Chip „Kodak KAF-8300“ ausgestattet ist, und dem während des Transits verwendeten 2×2 Binning haben wir die Auflösung der Bilder reduziert, um somit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) zu verbessern. Diese Methode gab uns die Sicherheit, dass der Exoplanet nicht während einer Belichtungsperiode den Pixel wechseln und die Auswertung verfälschen konnte.

Abbildung 9: Teleskop „Celestron 14 EdgeHD SCT“

Des Weiteren haben wir einen Luminanzfilter verwendet, der alle Transmissionen zwischen 400 und 700nm erfasst und somit die Schärfe und die Tiefe der aufgenommenen Fotos steuert und das unsichtbare Spektrum des Lichts einfängt, das die CCD-Kameras aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit nicht berücksichtigt (Abbildung 5).
Außerdem haben wir die GM 2000 HPS Ultraport Montierung verwendet, die mit einer Positionsgenauigkeit von unter 20 Bogensekunden ausgestattet ist. Damit das Guiding vollautomatisch und genau stattfinden konnte, haben wir außerdem ein weiteres Nachführteleskop benutzt. Der APM LZOS APO Refraktor mit dem SuperED-Triplett Objektiv hat einen Durchmesser von 130 mm und eine Brennweite von 780 mm und somit ein Öffnungsverhältnis von f/6. Zusammen mit der Celestron

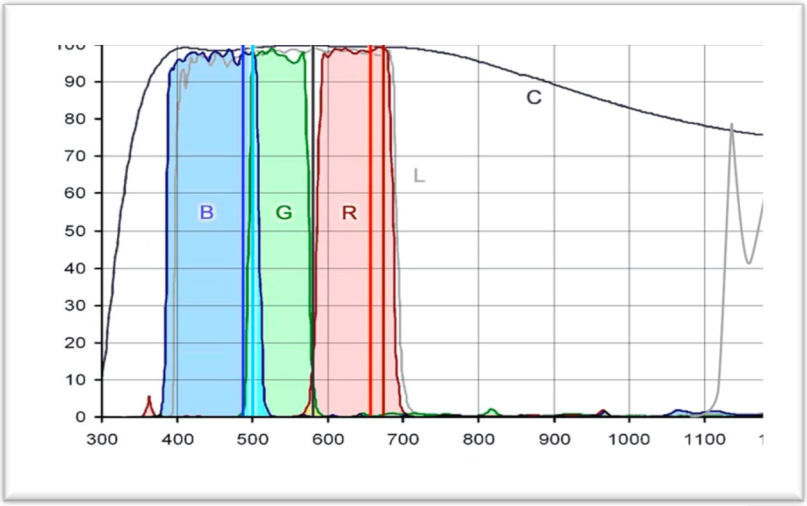


Abbildung 10: Transmissionskurven der Baader LRGBC Filter; Quelle: http://www.baader-planetarium.com/

NexImage Burst M Nachführkamera mit einer Pixelgröße von 3,75 µm war es dafür verantwortlich, dass der Stern durchgehend in der Mitte der Kamera blieb und somit periodisch ähnliche Aufnahmen von dem Sternhimmel gemacht werden konnten, die nur kaum oder geringfügig in der Konstellation der Himmelskörper variieren.

4.2 Vorbereitungen zur Beobachtung

Als wir uns auf die Suche nach einem geeigneten Exoplaneten begaben, gab es einige Dinge zu beachten. Einerseits war es wichtig, dass das Objekt hell genug ist und zum Beobachtungszeitpunkt hoch genug am Himmel steht, sodass es von unserem Teleskop aufgenommen werden konnte. Abgesehen davon musste der Transit zu einem geeigneten Zeitpunkt stattfinden, um potentielle Fehlerquellen aufgrund von athmosphärischen Helligkeitseinflüssen zu vermeiden.

Um für unsere Bedingungen passende Himmelsobjekte zu finden, haben wir die ETD (Exoplanet Transit Database) Seite genutzt. Die Startseite zeigte uns neben den Beobachtungen anderer Astronomen auch eine Liste aller Exoplaneten und wichtige Informationen.

Durch die Funktion *Transit predictions* (Roter Quader, Abbildung 12) konnte man ein Menü öffnen, in welches wir die Koordinaten des Teleskops eingetragen haben. Die **Elongitude** Koordinate entspricht dem Längengrad des Teleskops und die **Latitude** Koordinate stellt den Breitengrad dar. Für unser Teleskop, das in Soerth steht, würden die genauen Koordinaten 7,68° **Elongitude** und 50,70° **Langitude** lauten, die mit den Koordinaten des Teleskops am CFG von 7° **Elongitude** und 51° **Langitude** fast übereinstimmen.

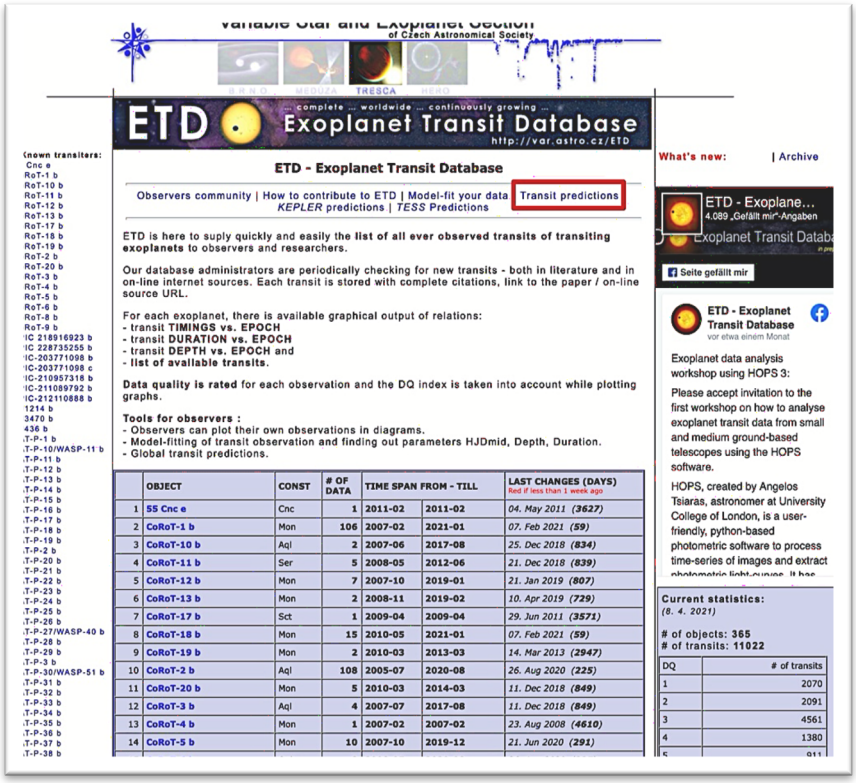


Abbildung 11: ETD Internetseite/Auflistung aller täglichen Transite

Daraufhin wurde eine Liste aller Exoplaneten mit einem Transit am ausgewählten Tag erstellt, wobei auf der Internetseite alle Transite in einem Zeitraum von etwa einem Monat aufgelistet werden.

Die Exoplanet Transit Database zeigt jedoch nicht nur den Zeitraum des Transits an, sondern liefert auch hilfreiche Daten zur Einordnung des Exoplaneten. So kann man neben dem Namen des Himmelobjekts und dem Sternbild, in dem es sich befindet, sowohl den Beginn (**BEGIN (UT/h, A)**), den zeitlichen Mittelpunkt des Transits (**CENTER (DD.MM.UT/h, A)**) und sein Ende (**END(UT/h, A)**) als auch den Verlauf am Nachthimmel ablesen. Außerdem stellt die Tabelle die genaue Transitdauer (**D(min)**) und die konstante Helligkeit des Exoplaneten in Magnituden vor und nach dem Transit dar (**V (MAG)**). Des Weiteren wird dort die erwartete

Helligkeitsabweichung und dementsprechend die Tiefe des Transits in Magnituden angegeben (**DEPTH(MAG)**).

4.3 Verwendete Computerprogramme

Da es uns leider nicht möglich war, die Beobachtung mit dem in der Schule stationierten Teleskop durchzuführen, weil zu dem Zeitpunkt des Experiments ein Lockdown uns daran hinderte und die Schule geschlossen war, haben wir uns dazu entschlossen, den Planetentransit von zu Hause aus zu beobachten und mittels des Programms *AnyDesk* das Teleskop unseres Fachlehrers und die dazugehörigen Messungen online zu steuern.

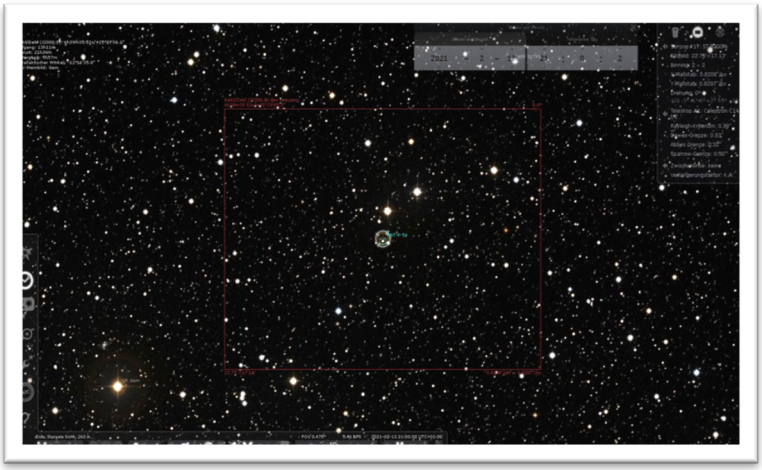


Abbildung 12: Darstellung des Exoplaneten HAT-54b im Computerprogramm Stellarium

Zuerst haben wir mithilfe des Computerprogramms *Stellarium* den Mutterstern des zu beobachtenden Exoplaneten HAT-P-54b am Nachthimmel ausfindig gemacht. Die ETD-Internetseite hatte uns schon den geschätzten Verlauf und die Position des Planeten anhand seines Sternbildes „Zwillinge“ aufgezeigt, somit musste das Computerprogramm *10-Micron Keypad* lediglich das Teleskop auf diesen Teil des Nachthimmels ausrichten. Mit dem *10-micron Keypad*, das online mit unserem Teleskop verbunden war und periodisch von der *10 Micron Clock Sync. Version 3.4* synchronisiert wurde, damit die Kamera auf diesen bestimmten Teil des Sternenhimmels fixiert blieb, konnte man anschließend noch kleine Feinjustierungen vornehmen, um den Mutterstern HAT-P-54 mittig ins Bild der Kamera zu verschieben.

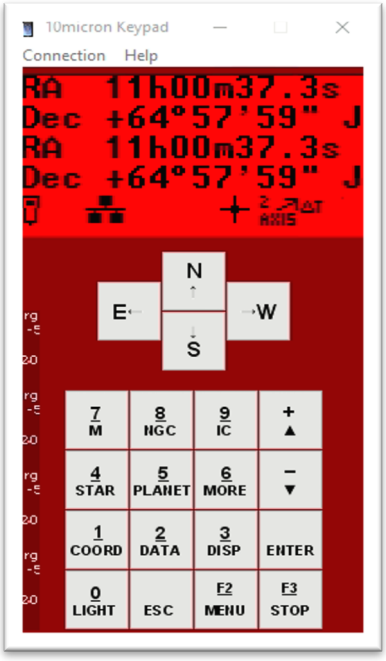


Abbildung 13: Programm „10micron Keypad“ zur Steuerung der Kamera

Ein weiterer wichtiger Bestandteil unserer Beobachtung war das Autoguiding des Teleskops, was dafür verantwortlich war, dass das Teleskop der Bahn des Exoplaneten entsprechend mitrotiert und der Planet mittig in der Kamera blieb. Dafür haben wir das Programm *SpecTrack 1.0* verwendet, was somit die Belichtungszeit entsprechend der Rotation des Teleskops reguliert hat. Das *Camera Control* Programm ermöglichte uns die Fernsteuerung der Kamera, sodass man online die Belichtungszeit mit dem Modul **Seconds** einstellen konnte. Des Weiteren konnte man das **X-** und **Y-Binning** der Kamera variieren. Bei unseren Beobachtungen haben wir ausschließlich das 2×2 Binning verwendet, was bewirkt, dass die Intensität benachbarter Pixel zusammengefasst werden und somit das Bildrauschen und die Ausgabezeit minimiert werden.

Außerdem war es uns möglich, durch dieses Kameraprogramm den Frametyp **Frame Type** der Bilder zu ändern, sodass wir hinterher die Möglichkeit hatten, durch die

verschiedenen Images die Rohbilder des Sternenhimmels zu perfektionieren, um somit eine sehr exakte Lichtkurve des Exoplaneten zu erstellen.

Das wohl wichtigste Computerprogramm für unser Beobachtungsverfahren war *Maxim DL Pro 6*. Dieses Programm sammelt, speichert und analysiert wissenschaftliche Daten und nimmt Bilder des Nachthimmels auf. Das *Camera Control*-Tool fixiert das Teleskop mitsamt seiner Kamera auf den gewünschten Bereich des Himmels und Maxime DL speichert die Bilder in Form von Daten ab. So war es uns möglich, verschiedene Frames der Kamera anzuwenden und somit unterschiedliche Bilder des Nachthimmels aufzunehmen, die uns letztendlich eine Optimierung der eigentlichen Rohbilder ermöglichten.

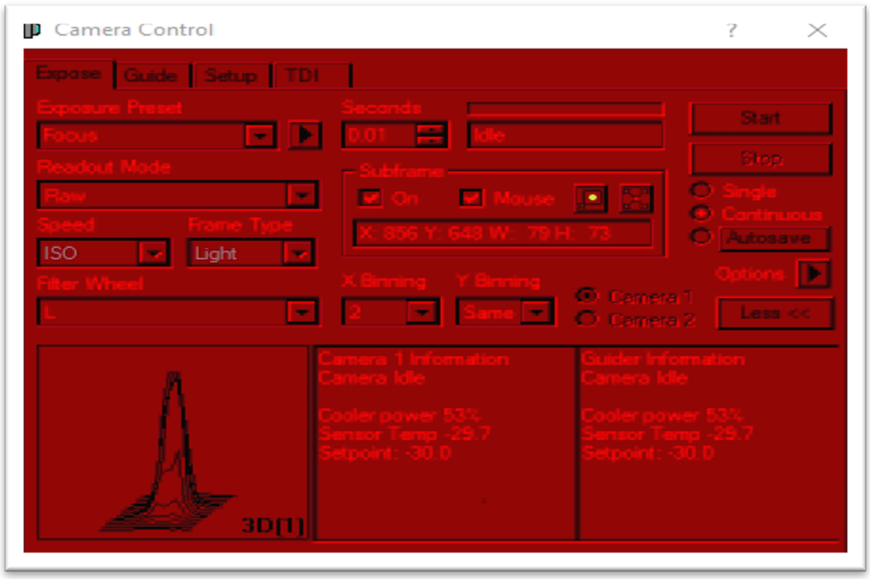


Abbildung 14: Camera Control Programm

Nachdem man also die genauen Einstellungen vorgenommen hatte und auch die Belichtungszeit angepasst hatte, konnten wir uns durch das **Autosave** Modul des Programms die erwünschte Anzahl an Bildern automatisch aufnehmen lassen.

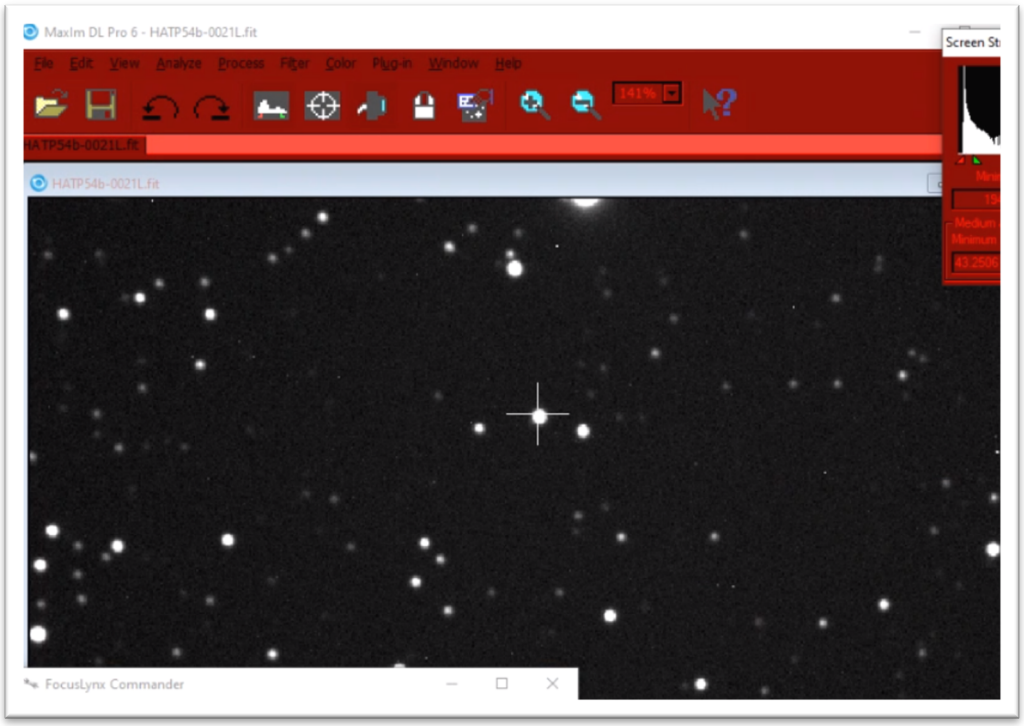


Abbildung 15: Bild des Sternhimmels mit markiertem Zentralstern HAT-P-54 in Maxim DL

5 Durchführung der Beobachtung

5.1 Voreinstellungen

Nachdem wir die entsprechenden Einstellungen an den Computerprogrammen zur Fokussierung des Objekts vorgenommen hatten, konnten wir die ersten Bilder des Sternhimmels vor der Bedeckung des Sterns HAT-P-54 erfassen. Zunächst machten wir einige Testbelichtungen, um sicherzustellen, dass die Fotos nicht durch andere Helligkeitsquellen oder Fehleinstellungen verfälscht und für unser weiteres Verfahren unbrauchbar werden.
Wir haben während der gesamten Beobachtung einen gekühlten CCD-Sensor mit einer Temperatur von -30°C verwendet. Das kontrollierte Kühlen eines Sensors war für unsere Beobachtung sehr wichtig, da sich die Temperatur der Kamera während einer langen Benutzung um mehrere Grad verändert, was auf die Darkaufnahmen mit einer hohen Belichtungszeit von 100s oder mehr einen schlechten Einfluss hat. Durch eine hohe Temperatur der Kamera erhöht sich das Rauschen der Bilder, was sich allein schon durch die Körpertemperatur, wenn man eine Kamera kurz in der Hand hält, bemerkbar machen kann. Außerdem ist es wichtig, dass die Kühlung kontrolliert und mit etwas Vorlauf vorgenommen wird, damit ein Gleichgewicht zwischen produzierter und abgeführter Wärme entsteht. Somit muss auch die Kamera zunächst an die Außentemperatur angepasst werden, da sie sonst den Sensor zu schnell erwärmen würde, sodass die kontrollierte Kühlung nicht funktionieren könnte. Die Wärme entsteht aber nicht nur durch das Erwärmen der Kamera, sondern kann auch durch den Lüfter oder die steigende Temperatur des Chips verursacht werden, die dementsprechend auch kontrolliert gekühlt werden müssen.

5.2 Aufnehmen von Darkframes

Die ersten Aufnahmen starteten wir um 20:30 MEZ. Durch eine längere Belichtungszeit von 60s pro Aufnahme und das verwendete 2×2 Binning, sowie den verwendeten L-Filter der Kamera war es uns möglich, mithilfe dieser Bilder die Grundlage für das erfolgreiche Erstellen einer Lichtkurve zu schaffen. Die ersten Bilder waren „Light“-Aufnahmen der Objekte, die als Rohbilder unserer Beobachtung fungierten und die eigentlichen Bilder des Sternhimmels sind und somit die Rohinformationen beinhalten. Von den Light-Aufnahmen mussten nicht viele gemacht werden, da wir eine hohe Belichtungszeit für die Bilder verwendet haben und somit der ISO-Wert beziehungsweise die Filmempfindlichkeit, die angibt wie viel Licht zum Fotographieren benötigt wird, nicht so hoch war.
Als der Transit um 21:19 MEZ begann, haben wir die ersten Darkframes des zu fotographierenden Bereichs gemacht. Insgesamt waren es 10 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von jeweils 100s mit einem 2×2 Binning. Anschließend haben wir mit einem 1×1 Binning 25 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von jeweils 120s gemacht. Danach haben wir noch vier Dark-Aufnahmen mit einem 2×2 Binning und einer Bildbelichtungszeit von 120s aufgenommen. Um nun auch einige kurzzeitbelichtete Darkframes machen zu können, damit der Masterdark aus möglichst vielen Bildern mit unterschiedlichen Belichtungszeiten besteht und somit ein sehr genaues Bild entsteht, das sich aus Darkframes mit verschiedenen Bildinformationen zusammensetzt, haben wir die Aufnahme der Darkframes mit 20 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von jeweils 1s abgeschlossen.

Darkframes werden primär aufgenommen, um das Dunkelrauschen sowie das Verstärkerglühen aus dem Lightframe entfernen zu können. Dazu macht man diese Aufnahmen mit einer geschlossenen Objektivkappe. Auch wenn die Kamera so nun keine Lichtinformationen empfangen kann, wirken thermische und elektrische Einflüsse innerhalb der Kamera so, dass schwache Signale in Form von Störeinflüssen aufgezeichnet werden können.

5.3 Aufnehmen von Flatfields

Anschließend haben wir 20 FlatFields mit einem 2×2 Binning erstellt. Hierbei war es wichtig zu beachten, dass die Kameraeinstellungen und der Fokus exakt mit den Einstellungen der Light-Aufnahmen übereinstimmten. Außerdem musste das Teleskop auf genau denselben Bereich des Nachthimmels ausgerichtet sein, damit die FlatFields ihre gewünschte Wirkung erzielen konnten und unter denselben Voraussetzungen wie die Rohbilder gemacht werden konnten. Ein FlatField dient zur Staubkorrektur der Lightframes und weist somit nicht viele Bildinformationen auf, da die erhoffte Korrektur nur dann realisiert werden kann, wenn das Flatframe möglichst hell ist. Dazu werden die Flatframes meist mit einer Ausrichtungen gegen ein helles Objekt aufgenommen.

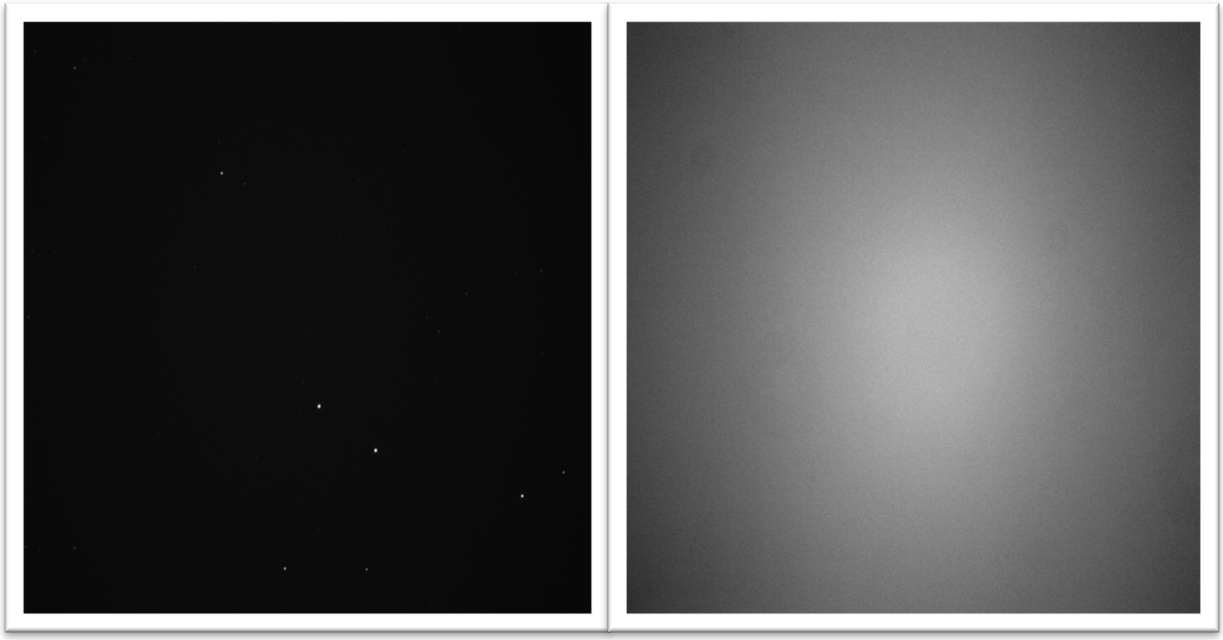


Abbildung 16: Vergleich zwischen Rohbild von Darkframe (links) und Flatframe (rechts)

5.4 Kalibrierung der Aufnahmen

Nachdem wir alle verschiedenen Aufnahmetypen abgespeichert hatten, haben wir uns in den darauffolgenden Wochen des Projektkurses mit der Kalibrierung beziehungsweise Aufbereitung der Bilder beschäftigt. Das war notwendig, da die jeweiligen Aufnahmen natürlich noch ein Bildrauschen beinhalteten, das die Lichtkurve verfälscht hätte. Dazu haben wir weiterhin mit dem Bildbearbeitungsprogramm **Maxim DL** gearbeitet. Damit die Kalibrierung der Bilder hinterher ausreichend ist, müssen Masterdarks der Dark-Aufnahmen erstellt werden, das heißt, dass alle DarkFrames addiert werden, sodass ein Bild entsteht, das die Bildinformationen aller anderen erhält. Dieses Masterdark wurde von dem Computerprogramm **Maxim DL** automatisch erstellt und musste nun nur noch von den Light-Aufnahmen sowie den Flat-Aufnahmen subtrahiert werden:

$$\text{kalibriertes Light} = \frac{\text{Light} - \text{MasterDark}_1}{\text{Flat} - \text{MasterDark}_2}$$

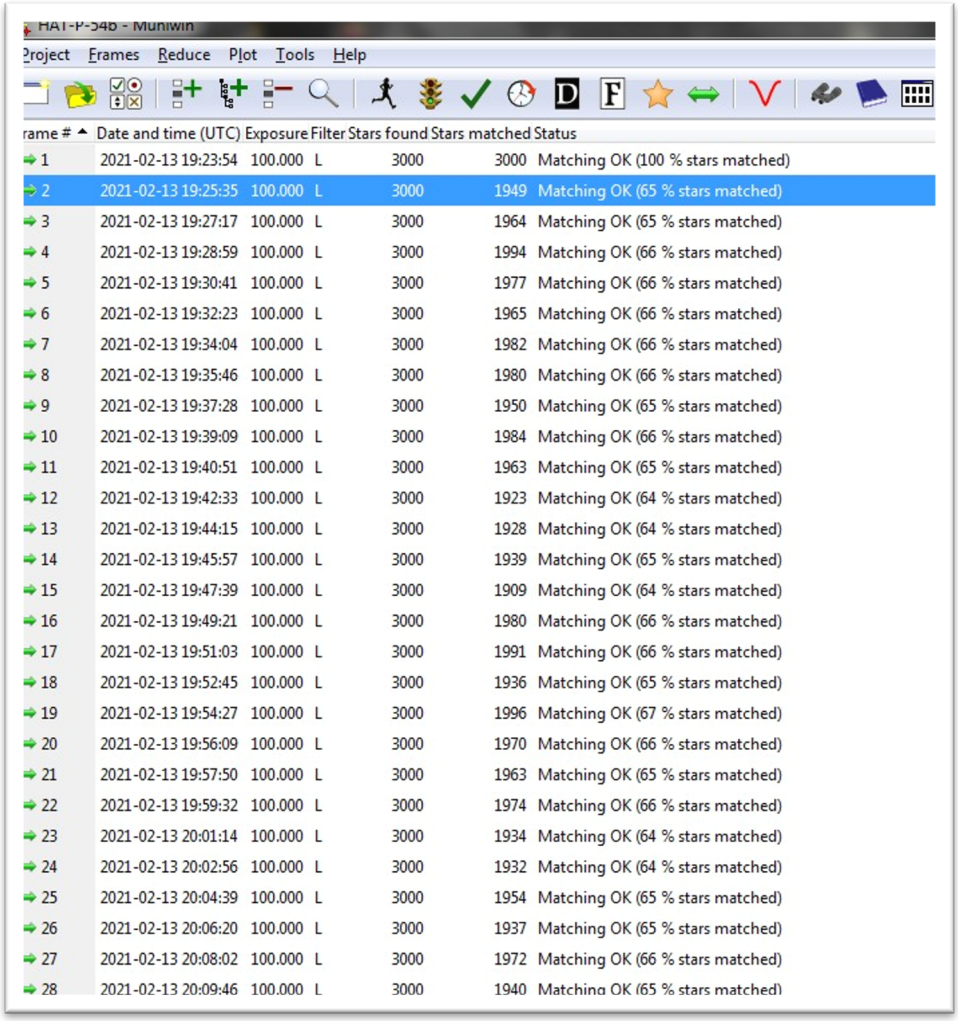
$$\frac{\text{Light} - \text{MasterDark}}{\text{MasterFlat}}$$

Auf diese Art und Weise war es uns möglich, die kalibrierten Light-Aufnahmen zu erhalten, mit denen wir anschließend weiterarbeiten konnten. Dieser Vorgang wurde somit mit jedem Light-Bild abgeschlossen, sodass wir diesen Datensatz speichern konnten und für das Erstellen einer Lichtkurve verwenden konnten.

6 Aufbereitung der Aufnahmen

6.1 Erstellen einer Lichtkurve

Nun haben wir mit dem Computergramm „Muniwin“ eine Lichtkurve des Transits erstellt. Dazu mussten wir zuerst die kalibrierten Bilder in ein neues Projekt importieren, damit diese später zu einem Graphen zusammengefasst werden konnten. Dazu drückt man in diesem Programm auf den Reiter **Project** und erstellt unter dem Modul **New** ein neues Project. Anschließend öffnet sich ein Fenster, in das man die ausgewählten kalibrierten Bilder einfügt. Dieses Fenster zeigt nun auch einige Funktionen an, die das Computergramm bietet, jedoch ist für uns nur das Erstellen einer Lichtkurve **Light Kurve** interessant. Hat man jetzt alle Bilder eingefügt, drückt man auf **OK** und die Bilder sind als eine Auflistung von Daten einzusehen.
Diese Auflistung beinhaltet neben dem Datum, an dem das Bild gemacht wurde, den Filter und die Anzahl an Sternen, die das Programm in dem Bild finden konnte, sowie die Belichtungszeit der einzelnen Bilder. Die Auflistung der Aufnahmen im Programm *Muniwin* sah nun folgendermaßen aus:



rame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
1	2021-02-13 19:23:54	100.000	L	3000	3000	Matching OK (100 % stars matched)
2	2021-02-13 19:25:35	100.000	L	3000	1949	Matching OK (65 % stars matched)
3	2021-02-13 19:27:17	100.000	L	3000	1964	Matching OK (65 % stars matched)
4	2021-02-13 19:28:59	100.000	L	3000	1994	Matching OK (66 % stars matched)
5	2021-02-13 19:30:41	100.000	L	3000	1977	Matching OK (66 % stars matched)
6	2021-02-13 19:32:23	100.000	L	3000	1965	Matching OK (66 % stars matched)
7	2021-02-13 19:34:04	100.000	L	3000	1982	Matching OK (66 % stars matched)
8	2021-02-13 19:35:46	100.000	L	3000	1980	Matching OK (66 % stars matched)
9	2021-02-13 19:37:28	100.000	L	3000	1950	Matching OK (65 % stars matched)
10	2021-02-13 19:39:09	100.000	L	3000	1984	Matching OK (66 % stars matched)
11	2021-02-13 19:40:51	100.000	L	3000	1963	Matching OK (65 % stars matched)
12	2021-02-13 19:42:33	100.000	L	3000	1923	Matching OK (64 % stars matched)
13	2021-02-13 19:44:15	100.000	L	3000	1928	Matching OK (64 % stars matched)
14	2021-02-13 19:45:57	100.000	L	3000	1939	Matching OK (65 % stars matched)
15	2021-02-13 19:47:39	100.000	L	3000	1909	Matching OK (64 % stars matched)
16	2021-02-13 19:49:21	100.000	L	3000	1980	Matching OK (66 % stars matched)
17	2021-02-13 19:51:03	100.000	L	3000	1991	Matching OK (66 % stars matched)
18	2021-02-13 19:52:45	100.000	L	3000	1936	Matching OK (65 % stars matched)
19	2021-02-13 19:54:27	100.000	L	3000	1996	Matching OK (67 % stars matched)
20	2021-02-13 19:56:09	100.000	L	3000	1970	Matching OK (66 % stars matched)
21	2021-02-13 19:57:50	100.000	L	3000	1963	Matching OK (65 % stars matched)
22	2021-02-13 19:59:32	100.000	L	3000	1974	Matching OK (66 % stars matched)
23	2021-02-13 20:01:14	100.000	L	3000	1934	Matching OK (64 % stars matched)
24	2021-02-13 20:02:56	100.000	L	3000	1932	Matching OK (64 % stars matched)
25	2021-02-13 20:04:39	100.000	L	3000	1954	Matching OK (65 % stars matched)
26	2021-02-13 20:06:20	100.000	L	3000	1937	Matching OK (65 % stars matched)
27	2021-02-13 20:08:02	100.000	L	3000	1972	Matching OK (66 % stars matched)
28	2021-02-13 20:09:46	100.000	L	3000	1940	Matching OK (65 % stars matched)

Abbildung 17: Auflistung aller Bilder in Muniwin

Damit das Programm nun diese Bilder analysieren kann, ist es notwendig, dass noch einige Einstellungen vorgenommen werden, die dem Algorithmus mitteilen, was in den Aufnahmen genau gesucht wird. Dazu ruft man den Reiter **Project Settings** auf, der sich in der Kopfzeile des Programms befindet und es öffnet sich erneut ein Fenster, in dem man die Kameraeinstellung sowie die Methode zum Suchen von Sternen innerhalb der vorliegenden Bilder einstellen kann.
Das Ausleserauschen **Readout Noise** haben wir auf ein Maximum von 9.30 begrenzt und den Wert für das **ADC gain** auf 0.37.
Nachdem wir die Einstellungen für die CCD-Kamera vorgenommen hatten, mussten wir unter dem Modul **Location** den genauen Aufnahmeort der Fotos mitsamt seiner Koordinaten bestimmen (Abbildung 19). Anschließend musste man der Software unter dem Modul **Star detection** Einstellungen vorgeben, die der Algorithmus beim Analysieren der Bilder beziehungsweise beim Suchen der Sterne in den vorliegenden Aufnahmen benutzt. Dazu hat man ein

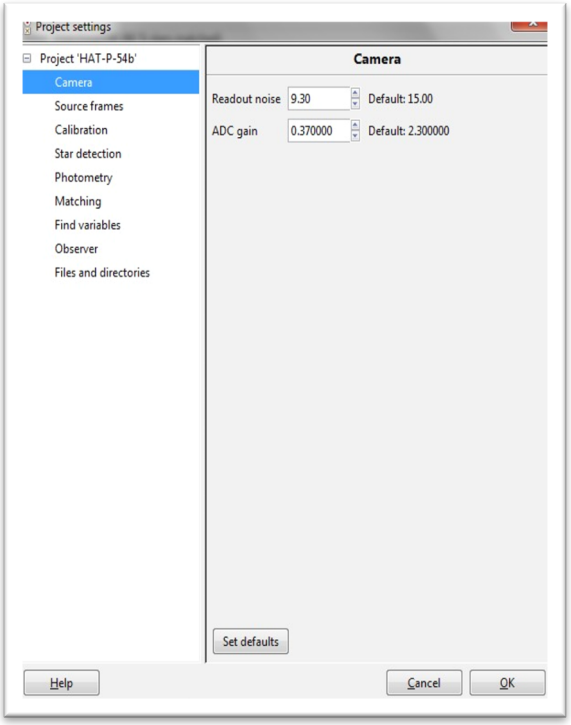


Abbildung 18: Kameraeinstellungen im Programm Muniwin

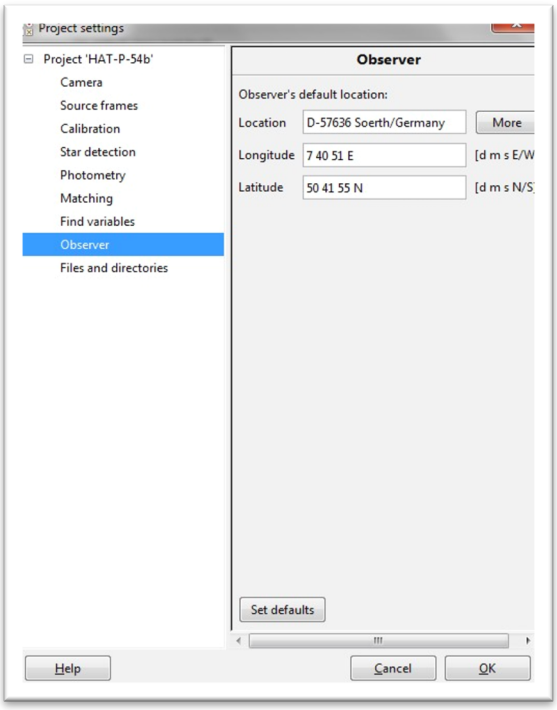


Abbildung 19: Einstellungen zur Lokalisation

Maximum an Sternen festgelegt, die in den Bildern entdeckt werden können. In unserem Fall waren das 3000 Sterne. Damit jedoch nicht nur kleine und schwache Sterne entdeckt werden, sondern stattdessen nur die wichtigsten und hellsten Objekte festgehalten werden, mussten wir die Auswahl an Objekte durch eine Mindest- und eine Maximalschärfe begrenzen. Dazu haben wir den vorgegebenen Wert von 0.20 als Minimalwert und 1.00 als obere Grenze sowie eine Minimalrundheit von -1.00 und 1.00 als Maximalwert dafür festgelegt. Außerdem mussten die Objekte, die später relevant für das Erstellen einer Lichtkurve sind, eine Helligkeit von mindestens 4.00 haben, sodass die Sterne, die zwar von der Schärfe und der Form zu unseren Vorgaben passten, jedoch zu schwach waren, um sie für einen Helligkeitsvergleich zu verwenden, aussortiert werden konnten.

Nachdem jetzt alle ausschlaggebenden Einstellungen vorgenommen worden waren, wurde durch das Modul **Plot light curve** ein Fenster geöffnet, in dem einerseits der Exoplanet HAT-P-54b, sowie dessen Verortung und andererseits erneut der Standort des Teleskops und somit auch der Aufnahmeort aller Bilder aufgeführt waren (Abbildung 21). Klickt man nun auf Apply, so öffnet sich ein Bild des Sternhimmels, in dem der Exoplanet HAT-P-54b mit der Bezeichnung **var** gekennzeichnet ist. Nun wählt man einige Sterne aus dem vorliegenden Bild aus, die eine möglichst konstante Helligkeit aufweisen und die somit als Vergleichssterne **comp**, auch Referenzsterne genannt, fungieren.
Dann misst das Programm Muniwin die Helligkeit dieser Sterne und kann somit die Helligkeitsveränderung des Zentralsterns HAT-P-54 erkennen. Dabei sollten die Referenzsterne eine ausgeglichene Verteilung der Grundfarben Rot, Grün und Blau haben, damit diese Farben später bei der Lichtkurve nicht zu stark varriieren. Außerdem legt man

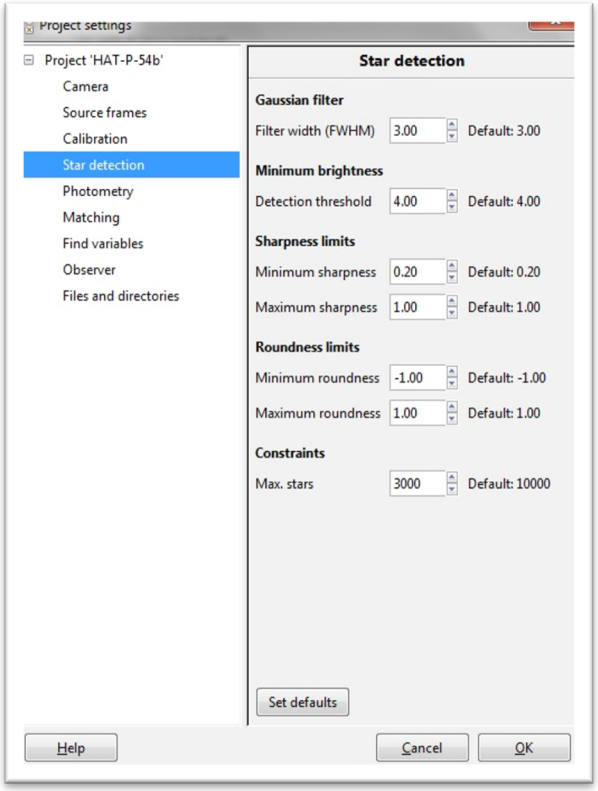


Abbildung 20: Einstellungen zur Suche nach Sternen in den vorliegenden Aufnahmen

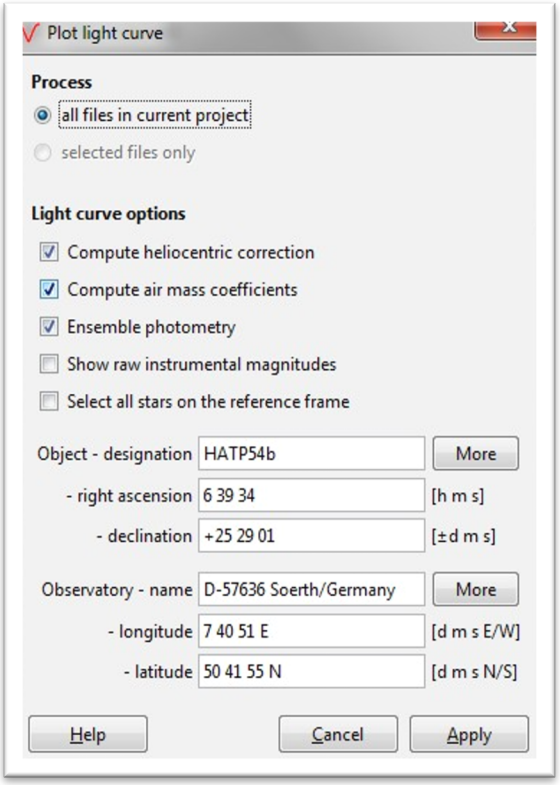


Abbildung 21: Einstellungen der Lichtkurve in Muniwin

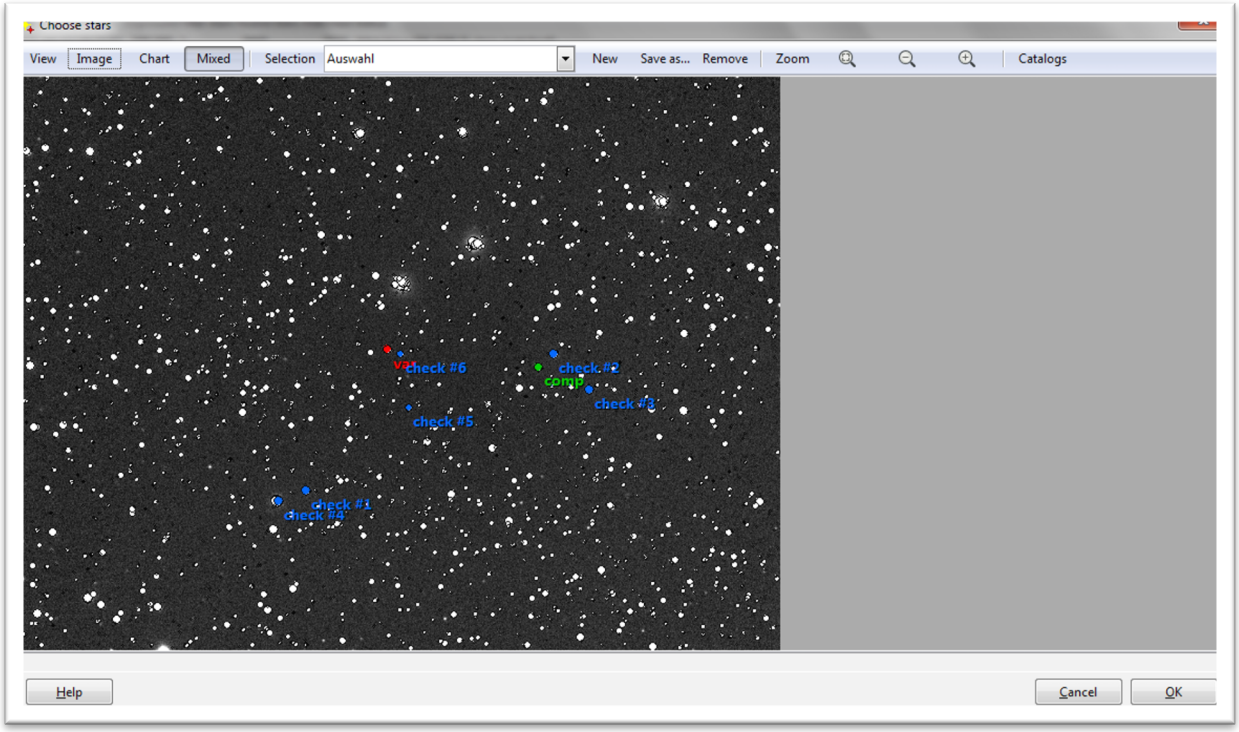


Abbildung 22: Bild des Sternhimmels in Muniwin mit ausgewählten Vergleichs- und Checksternen

üblicherweise noch einige Sterne als Checksterne **check** fest, die somit die Sicherheit geben, dass, falls die ausgewähltenVergleichssterne nicht das erwünschte Ergebnis liefern, weiterhin genug Daten für eine Helligkeitskurve vorliegen.
Wenn man nun auf **OK** drückt, öffnet sich eine Auswahl der Aperturen, die jedoch vorerst ignoriert werden kann.

Wenn man nun diese Auswahl erneut bestätigt, wird in Muniwin eine Lichtkurve erstellt. Die einzelnen Punkte dieser Lichtkurve weisen außerdem noch einen Fehlerbereich auf, da die Helligkeitsabweichungen nie ganz exakt bestimmt werden können.

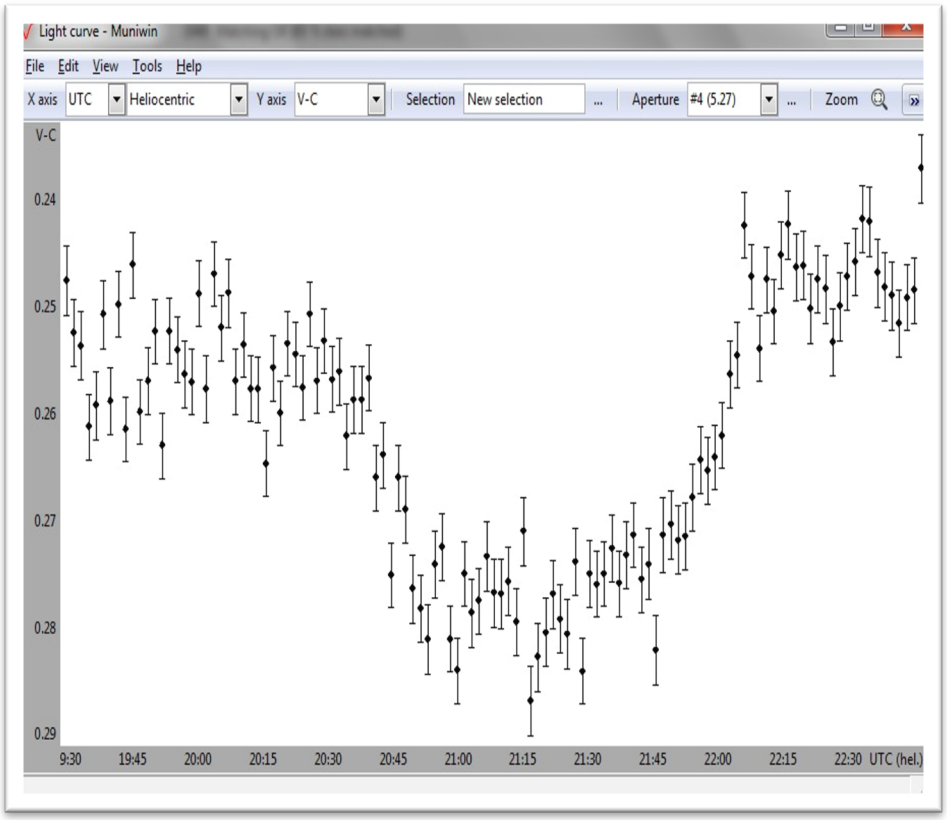


Abbildung 23: Lichtkurve in Muniwin

7 Berechnungen der Exoplanetenparameter

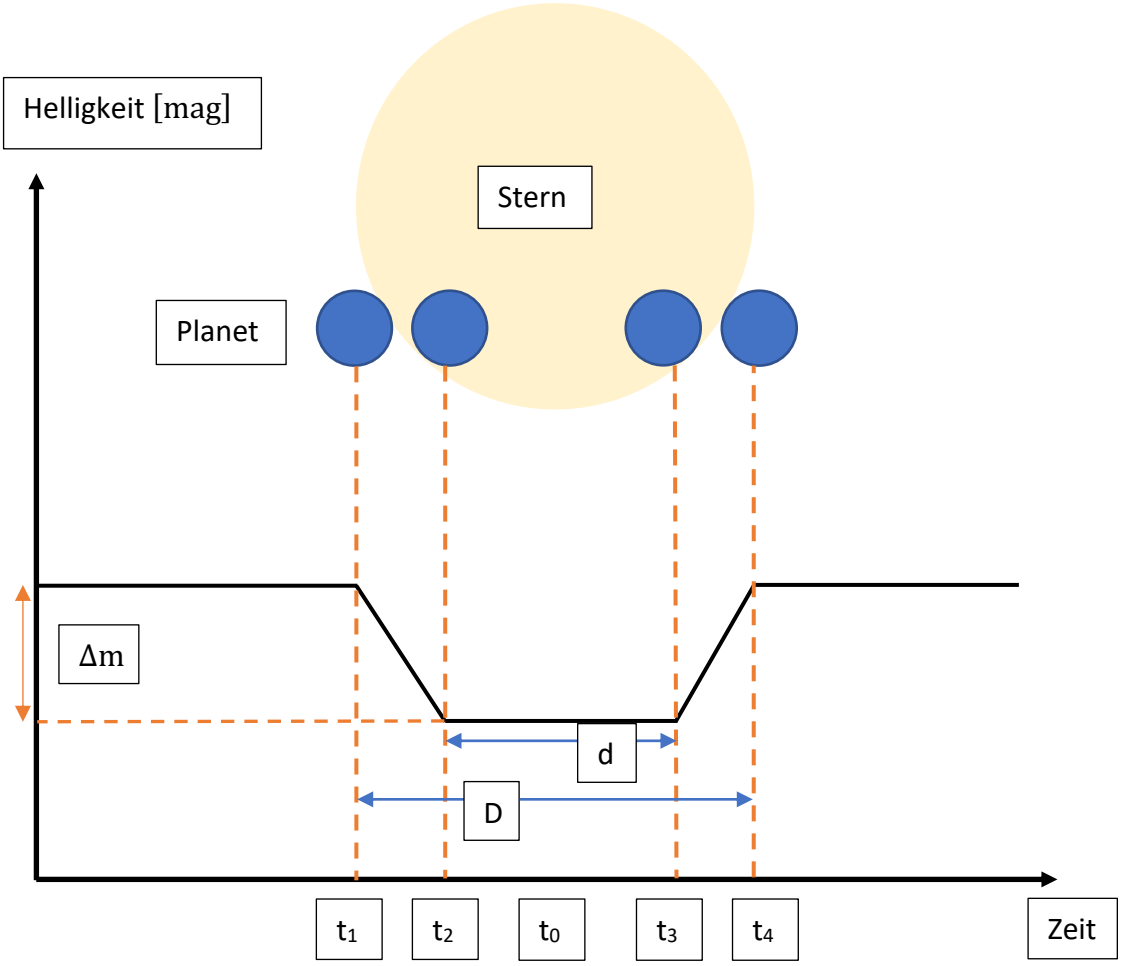


Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung eines Exoplanetentransits mit beschrifteten Parametern

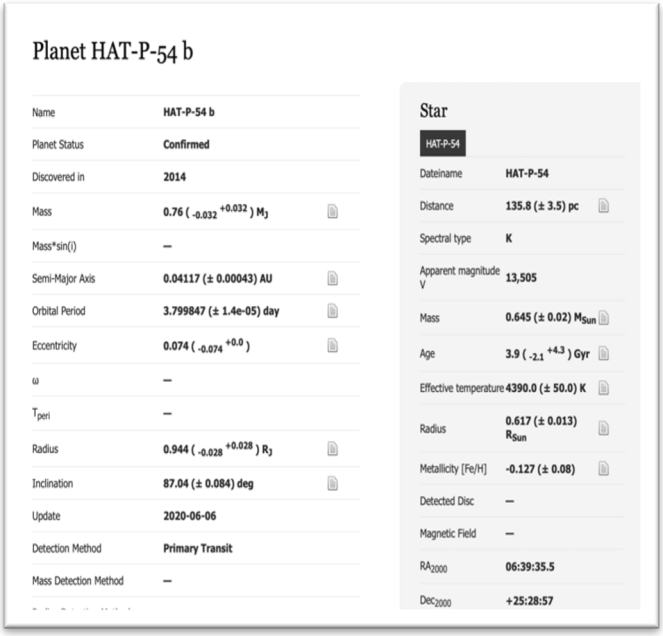
7.1 Parameter des Exoplanetentransits

-> t_1 : Beginn des Transits, Planet befindet sich noch nicht vor dem Stern
-> t_2 : Planet ist komplett eingetreten, Helligkeit des Sterns hat abgenommen
-> t_0 : Mitte des Transits
-> t_3 : Ende der Bedeckung beginnt, Helligkeit des Sterns nimmt danach wieder zu und Planet beginnt auszutreten
-> t_4 : Ende des Austritts, Transit ist abgeschlossen und der Stern weist seine ursprüngliche Helligkeit auf
-> D : Dauer des vollständigen Planetentransits (t_1-t_4)
-> d : Dauer des Zeitraums, in dem sich der Planet vollständig vor dem Stern befindet (t_2-t_3)
-> Δm : Tiefe der Bedeckung

7.2 Theoretische Grundlagen zum Planetentransit

Zur Berechnung der Parameter des Exoplaneten HAT-P-54b werden sowohl einige gegebene Formeln als auch bereits festgelegte Messparameter der Exoplanet.eu[7]- und der ExoplanetTransitDatabase[8]- Internetseite benötigt.
Messparameter von Exoplanet.eu und ETD:

Tiefe der Bedeckung Δm = 0.0265 mag
Sternradius R_S = 0.617 Sonnenradien
Sternmasse M_S = 0.645 Sonnenmassen
Planetenradius R_P = 0.944 Jupiterradien
Planetenmasse M_P = 0.76 Jupitermassen
Umlaufperiode P = 3.799847 Tage



Planet HAT-P-54 b

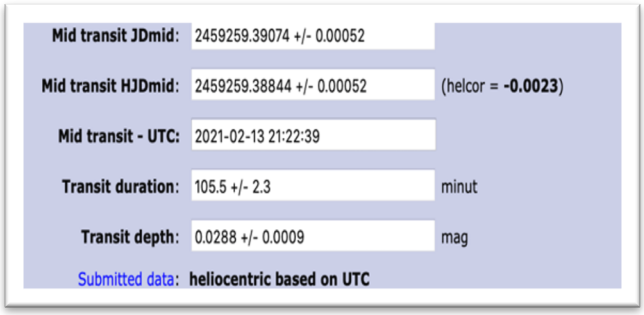
Name	HAT-P-54 b
Planet Status	Confirmed
Discovered in	2014
Mass	0.76 ($_{-0.032}^{+0.032}$) M_J
Mass*sin(i)	–
Semi-Major Axis	0.04117 (± 0.00043) AU
Orbital Period	3.799847 (± 1.4e-05) day
Eccentricity	0.074 ($_{-0.074}^{+0.0}$)
ω	–
T_{peri}	–
Radius	0.944 ($_{-0.028}^{+0.028}$) R_J
Inclination	87.04 (± 0.084) deg
Update	2020-06-06
Detection Method	Primary Transit
Mass Detection Method	–

Star

HAT-P-54

Dateiname	HAT-P-54
Distance	135.8 (± 3.5) pc
Spectral type	K
Apparent magnitude V	13,505
Mass	0.645 (± 0.02) M_{Sun}
Age	3.9 ($_{-2.1}^{+4.3}$) Gyr
Effective temperature	4390.0 (± 50.0) K
Radius	0.617 (± 0.013) R_{Sun}
Metallicity [Fe/H]	-0.127 (± 0.08)
Detected Disc	–
Magnetic Field	–
RA_{2000}	06:39:35.5
Dec_{2000}	+25:28:57

Abbildung 25: Exoplanet.eu Internetseite mit Richtwerten für benötigte Parameter



Mid transit JDmid:	2459259.39074 +/- 0.00052	
Mid transit HJDmid:	2459259.38844 +/- 0.00052	(helcor = **-0.0023**)
Mid transit - UTC:	2021-02-13 21:22:39	
Transit duration:	105.5 +/- 2.3	minut
Transit depth:	0.0288 +/- 0.0009	mag
Submitted data:	heliocentric based on UTC	

Abbildung 26: ETD Seite mit weiteren Richtwerten für Parameter des Exoplaneten

Sowohl die Masse als auch der Radius des Zentralsterns werden in Sonneneinheiten beziehungsweise Jupitereinheiten angegeben, da somit ein Richtwert für jeden Exoplaneten und seinen Mutterstern besteht, der die weiteren Kalkulationen vereinfacht. Diese Parameter setzen sich aus verschiedenen Beobachtungen und Berechnungen von Astronomen zusammen und können durch die Genauigkeit der verwendeten Instrumente und Berechnungsverfahren als Richtwerte für die weitere Berechnung verwendet werden.

Tabelle 1: Darstellung aller benötigten Exoplanetenparameter mit Umrechnung

Parameter	Richtwert	Umgerechnet
Tiefe der Bedeckung Δm	0.0265 $[mag]$	/
Sternradius R_S	0.617 $[R_{Sun}]$	429643 $[km]$
Planetenradius R_P	0.944 $[R_J]$	67 488.4 $[km]$
Umlaufzeit P	3.799847 $[d]$	0.010403 $[a]$

[7] http://exoplanet.eu/; zuletzt eingesehen am: 03.05.2021
[8] http://var2.astro.cz/; zuletzt eingesehen am: 03.05.2021

7.3 Herleitung und Berechnung der Parameter

7.3.1 Differenz der Strahlungsleistung

Der gegebene Wert für die Tiefe der Bedeckung Δm kann nun für die weitere Berechnung der Differenz der Strahlungsleistung des Sterns ΔF verwendet werden. Die Formel zur Kalkulation dieser lautet:

$$\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{F_1} = 1 - \frac{F_2}{F_1}$$

Dazu wird die Helligkeit F_2 des Sterns während des Transits von der Helligkeit F_1 des Sterns vor der Bedeckung subtrahiert und durch diese wiederum dividiert. Für F_1 lässt sich mit der Formel 1 ein genauer Wert festlegen, der sich aus der Kugeloberfläche $4\pi \times {R_S}^2$ sowie der Boltzmann-Konstanten K und der Oberflächentemperatur T_S ergibt.

$$F_1 = 4 \times \pi \times {R_S}^2 \times \sigma \times {T_S}^4$$

Ein Teil dieser Gleichung ist die Formel für das Stefan-Boltzmann-Gesetz mit der Boltzmann-Konstanten K:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \times K^4$$

Daraus ergibt sich nun folgende Gleichung für F_2, die also den Zustand während der Bedeckung beschreibt und neben des Sternradius R_S außerdem auch den Planetenradius R_P beinhaltet:

$$F_2 = 4 \times \pi \times {R_S}^2 \times \sigma \times {T_S}^4 - 4 \times \pi \times {R_P}^2 \times \sigma \times {T_S}^4$$

$$F_2 = 4 \times \pi \times ({R_S}^2 - {R_P}^2) \times \sigma \times {T_S}^4$$

Mithilfe der Formeln für F_1 und F_2 kann man nun die Differenz der Strahlungsleistung bilden:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{4 \times \pi \times ({R_S}^2 - {R_P}^2) \times \sigma \times {T_S}^4}{4 \times \pi \times {R_S}^2 \times \sigma \times {T_S}^4} = \frac{{R_S}^2 - {R_P}^2}{{R_S}^2} = \frac{{R_S}^2}{{R_S}^2} - \frac{{R_P}^2}{{R_S}^2} = 1 - \frac{{R_P}^2}{{R_S}^2}$$

Jetzt kann man die vereinfachte Gleichung in die Formel für ΔF einsetzen, sodass sich die Änderung der Strahlungsleistung letztendlich folgendermaßen darstellen lässt:

$$\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{F_1} = 1 - \frac{F_2}{F_1} = 1 - 1 + (\frac{R_P}{R_S})^2 = (\frac{R_P}{R_S})^2$$

$$\Delta F = (\frac{R_P}{R_S})^2 \quad (1)$$

Die Radien des Sterns und des Planeten sind bekannt, müssen jedoch in Kilometer umgerechnet werden, damit man die Werte zur Berechnung der Parameter verwenden kann. Dazu muss der Sternradius mit dem Sonnenradius und der Planetenradius mit dem Radius des Jupiters multipliziert werden:

$$R_S = 0.617\ R_{Sun} \times 695\ 700 = 429247\ \mathrm{km}$$

$$R_P = 0.944\ R_J \times 71\ 492 = 67488.4\ \mathrm{km}$$

Anhand dieser Werte kann nun die Änderung des Strahlungsleistung durch Formel 1 berechnet werden:

$$\Delta F = \left(\frac{67488.4}{429247}\right)^2 = 0.02472\ \mathrm{Fluss}$$

7.3.2 Tiefe der Bedeckung

Nun kann man diese Gleichung umstellen, indem man zuerst die Wurzel beider Seiten zieht und darauffolgend R_S auf beiden Seiten multipliziert. So ergibt sich eine Formel für R_P:

$$R_P = R_S \times \sqrt{\Delta F}$$

Die Änderung der Strahlungsleistung hat außerdem einen Einfluss auf die Tiefe der Bedeckung Δm, der sich durch folgende Gleichung beschreiben lässt:

$$\Delta m = \frac{\log_{10}(1 - \Delta F)}{-0.4}$$

Anschließend multipliziert man mit -0.4, zieht den Logarithmus und löst die Klammer nach ΔF auf, sodass sich die folgende Gleichung in Abhängigkeit von der Tiefe der Bedeckung Δm ergibt:

$$\Delta m = \frac{\log_{10}(1 - \Delta F)}{-0.4}$$

$$-0.4 \times \Delta m = \log_{10}(1 - \Delta F)$$

$$10^{-0.4 \times \Delta m} = 1 - \Delta F$$

$$\Delta F = 1 - 10^{-0.4 \times \Delta m}$$

Das setzt man nun in die Formel für R_P ein und erhält eine Gleichung für den Planetenradius, der sich durch die Differenz des Strahlungsverhältnis und den Radius des Muttersterns berechnen lässt:

$$R_P = R_S \times \sqrt{\Delta F} = R_S \times \sqrt{1 - 10^{-0.4\times\Delta m}} \quad (2)$$

Diese Formel lässt sich dementsprechend auch nach R_S umformen, sodass mit dem gegebenen Wert von einem der beiden Radien der andere errechnet werden kann. Die Gleichung für R_S würde also folgendermaßen aussehen:

$$R_S = \frac{R_P}{\sqrt{1 - 10^{-0.4\times\Delta m}}}$$

Auch wenn die Werte für die Radien beider Himmelskörper mittlerweile bekannt sind, kann man so die Literaturwerte der Internetseiten kontrollieren. Es ist klar, dass der errechnete Wert keinesfalls so genau sein kann wie die Werte von der exoplanet.eu-Seite, jedoch lassen sich so grobe Rechenfehler oder starke Abweichungen vermeiden, sodass für die folgenden Berechnungen ausschließlich genaue Zahlen verwendet werden können.
Beispielsweise nimmt man den berechneten Wert für R_S von 429 247 km und den Richtwert für Δm von 0.0265 mag und kann so durch Formel 2 den Planetenradius berechnen:

$$R_P = 429\,247 \times \sqrt{1 - 10^{-0.4\times 0.0265}} = 66\,653.6 \text{ km}$$

Außerdem ist es möglich die Tiefe der Bedeckung Δm anhand der Änderung der Strahlungsverhältnisse ΔF herauszufinden. Da der oben berechnete Wert für ΔF mit 0.02472 nah an den Richtwert von 0.024112 herankommt, verwende ich hier den berechneten Wert für ΔF für die folgende Gleichung. Setzt man diesen Wert nun in die bekannte Formel ein, so ergibt sich:

$$\Delta m = \frac{\log_{10}(1 - 0.02472)}{-0.4}$$

$$\Delta m = 0.027177 \text{ mag}$$

Die Berechnung von Δm ist für uns jedoch nicht wichtig, da wir sowohl durch die ETD-Seite als auch durch das Erstellen der Lichtkurve einen Wert für die Tiefe des Transits erhalten haben, die sich für das Errechnen anderer Parameter aufgrund ihrer Genauigkeit besser eignen.

7.3.3 Bahnneigung

Mithilfe der Abbildung 26 kann man nun auch noch eine Gesetzmäßigkeit zum Parameter l finden, die im späteren Verlaufe essentiell für die Berechnung der Bahnneigung i ist.
Wendet man nämlich nun den Satz des Pythagoras an, so erhält man laut Abbildung 27:

$$(R_S + R_P)^2 = (b \times R_S)^2 + l^2 = (a \times \cos i)^2 + l^2$$

$$l = \sqrt{(R_S + R_P)^2 - a^2 \times (\cos i)^2}$$

Setzt man nun diesen Term in die Formel vier ein und formt diese dementsprechend um, so erhält man:

$$D = \frac{P}{180°} \times \sin^{-1} \frac{\sqrt{(R_S + R_P)^2 - a^2 \times (\cos i)^2}}{a}$$

$$\frac{180°}{P} \times D = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(R_S + R_P)^2 - a^2 \times (\cos i)^2}}{a}$$

$$\sin\left(\frac{D}{P} \times 180°\right) = \frac{\sqrt{(R_S + R_P)^2 - a^2 \times (\cos i)^2}}{a}$$

$$\sin\left(\frac{D}{P} \times 180°\right)^2 = \frac{(R_S + R_P)^2 - a^2 \times (\cos i)^2}{a^2}$$

$$i = \cos^{-1} \sqrt{\frac{(R_S + R_P)^2}{a^2} - \sin\left(\frac{D}{P} \times 180°\right)^2} \quad (3)$$

Die Länge für a lässt sich durch das 3. Keplersche Gesetz festlegen und kann mithilfe dieser Formel errechnet werden:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} \times (M_S + M_P)$$

Hier wird die Gravitationskonstante G mit der Summe der Massen M_S und M_P beider Himmelskörper multipliziert, wobei man dabei die Masse des Exoplaneten vernachlässigen kann, da sie nur ein Bruchteil der Sternmasse ist und somit nicht berücksichtigt wird. Die Gravitationskonstante G wird auch nicht weiter berücksichtigt, da sie sich ebenso wie $4\pi^2$ aus der Formel herauskürzt.

Nun formt man die Gleichung nach a um, setzt für M_S einen Wert in Sonnenmassen und für P den vorliegenden Richtwert in Jahren ein und erhält für a in Astronomischen Einheiten AE:

$$a = \sqrt[3]{M_S \times P^2} \quad (4)$$

Für die weiteren Berechnungen ist der Parameter a erforderlich, der durch Formel 4 berechnet werden kann. Dazu nimmt man den bereits bekannten Wert für M_S in Sonnenradien und den Literaturwert für P von 3.799847 Tagen beziehungsweise 0.010403 Jahren, der sich nur berechnen lässt, wenn man den Stern über mehrere Tage beobachtet und somit zwei Transite feststellen kann, mit denen sich die Umlaufperiode des Exoplaneten bestimmen lässt:

$$a = \sqrt[3]{0.645 \times 0{,}010403} = 0{,}041174 \text{ AE}$$

Dieser Wert entspricht jedoch vorerst nur 0.041174 Astronomischen Einheiten, sodass er mit einer Astronomischen Einheit multipliziert werden muss, damit man mit ihm in Kilometern weiterrechnen kann:

$$a = 0.041174 \times 149\,597\,870.7 = 6\,159\,542.7 \text{ km}$$

Somit kann nun weiter nach Formel 3 verfahren, die man jedoch zunächst in unterschiedliche Rechnungen aufteilt. So lässt sich der erste Teil der Wurzel schnell mit den uns bekannten Parametern auflösen und errechnen:

$$\frac{(R_S + R_P)^2}{a^2} = \frac{(429\,247 + 67\,488.4)^2}{6\,159\,542.7^2} = 0.006504$$

Die Parameter der zweiten Rechnung der Wurzel sind soweit auch bekannt und müssen somit nur noch umgerechnet in Jahre in die Formel eingesetzt werden:

$$\sin^2\left(\frac{D}{P} \times 180°\right) = \sin^2\left(\frac{0.000204858}{0.010403} \times 180\right) = 0.003822$$

Nun werden diese beiden Werte subtrahiert, daraus wird eine Wurzel gezogen und anschließend der Arkuskosinus angewendet, sodass folgender Wert für die Bahnneigung i berechnet werden kann:

$$i = \cos^{-1}\sqrt{0.006504 - 0.003812} = 87.0319°$$

7.3.4 Impact Parameter

Der Impact Parameter b beschreibt den Höhenunterschied zwischen dem Zentrum des Zentralsterns und dem Zentrum seines Exoplaneten. Abbildung 27 veranschaulicht alle zur Berechnung notwendigen Parameter. Der Winkel i beschreibt die Neigung der Planetenbahn und a ist der Abstand zwischen den Zentren der Himmelskörper. Die Komponente l veranschaulicht hier den kürzesten Abstand zwischen dem Planetenzentrum und der Hauptachse des Sterns. Sobald sich der Exoplanet nah genug an seinem Mutterstern befindet, kann man den Parameter a auch mit der Summe der beiden Radien beschreiben.

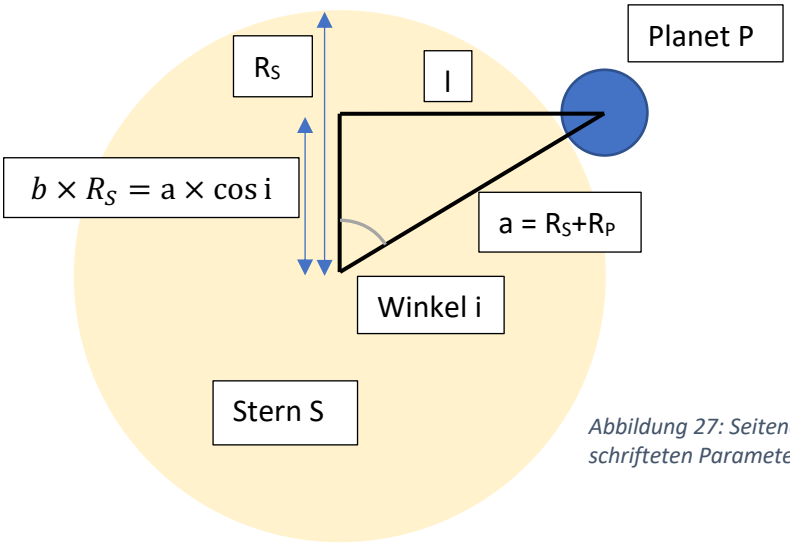


Abbildung 27: Seitenansicht des Systems mit beschrifteten Parametern

Aus den uns bekannten Regeln der Winkelgeometrie lässt sich folgender Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern feststellen:

$$\cos i = \frac{b \times R_S}{a}$$

So kann man die Funktion umformen und erhält folgende Gleichung für den Impact Parameter b:

$$b = \frac{a}{R_S} \times \cos i \quad (5)$$

Für die Berechnung des Impact Parameters müssen nur die zuvor berechneten Werte für den Abstand der Zentren beider Himmelskörper a, den Sternradius R_S und die Bahnneigung i in die Formel 5 eingesetzt werden:

$$b = \frac{6\,159\,579.28}{429\,643} \times \cos(87.026) = 0.743818$$

$$0.743818 \times 429\,643 = 319\,576$$

Das bedeutet, dass sich das Zentrum des Exoplaneten 319 576 km über dem Zentrum des Stens befindet. Dieser Wert ließ sich durch die Multiplikation des Impact Parameter mit dem Sternradius berechnen, der zugleich die Ankathete des in Abbildung 27 veranschaulichten Dreiecks ist, das sich aus dem Abstand a zwischen den Zentren beider Himmelskörper und der kürzesten Entfernung l des Planetenzentrum zur Hauptachse des Sterns bildet.

7.3.5 Dauer der Bedeckung

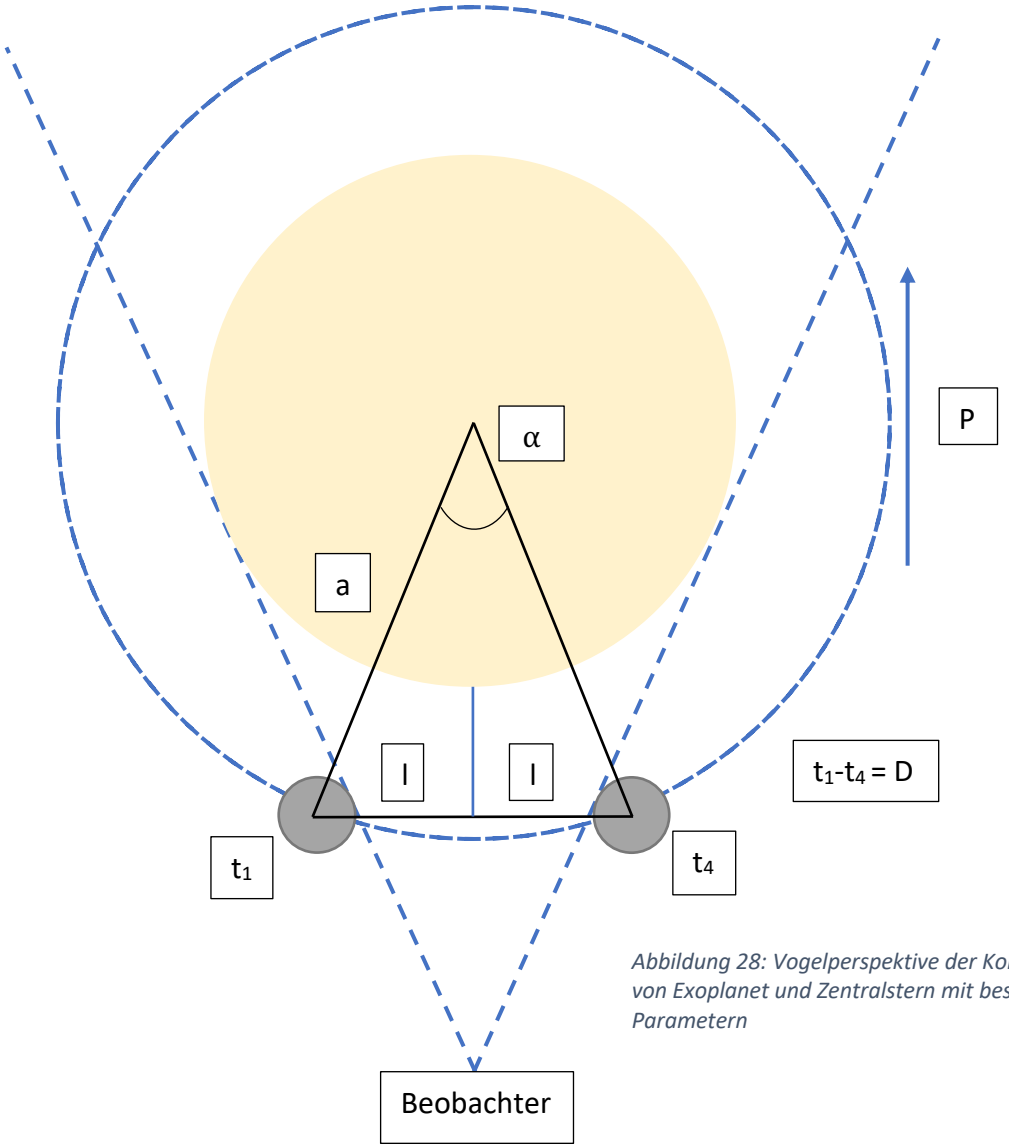


Abbildung 28: Vogelperspektive der Konstellation von Exoplanet und Zentralstern mit beschrifteten Parametern

Die Abbildung 28 demonstriert die Planetenlaufbahn aus der Vogelperspektive. Die Parameter t_1 und t_4 sind aus der Sicht des Beobachters die Zeitpunkte des Transitbeginns und des Transitendes, zwischen denen sich der Planet vor den Mutterstern schiebt. Diese gesamte Dauer wird durch den Parameter D, also die gesamte Zeit der Bedeckung, beschrieben.
Zusammen mit den Zentren des Planeten bei Ein- und Austritt bildet das Zentrum des Sterns ein Dreieck, dessen gleichschenklige Seiten dieselbe Länge haben wie der Parameter a aus Abbildung 28.
Durch diesen Zusammenhang lässt sich mit dem Wert für die volle Umlaufperiode P folgendes Verhältnis für die Dauer der Bedeckung D bilden:

$$\frac{D}{P} = \frac{\alpha}{360°}$$

$$D = \frac{\alpha}{360°} \times P$$

Außerdem kann man die Verhältnisse zwischen den Seiten folgendermaßen bestimmen und so umformen, dass sich eine Gleichung für α ergibt:

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{l}{a}$$

$$\alpha = 2 \times \sin^{-1}\frac{l}{a}$$

Diesen Ausdruck setzt man nun für α aus der Formel für die Dauer der Bedeckung D ein und erhält so eine Gleichung in Abhängigkeit von der Umlaufdauer P, der Hälfte des Abstands zwischen l dem Planeten beim Eintritt in den Transit und bei seinem Austritt und dem Abstand a der Zentren beider Himmelskörper:

$$D = \frac{2 \times P}{360°} \times \sin^{-1}\frac{l}{a} = \frac{P}{180°} \times \sin^{-1}\frac{l}{a} \quad (6)$$

Auch wenn die Berechnung der Dauer der Bedeckung für uns keine Relevanz hat, da wir sowohl bei den vorherigen Rechnungen als auch bei der Beobachtung des Planeten diesen Wert bereits kannten und uns am Richtwert im Internet orientiert hatten, ist es mithilfe von Formel 6 möglich, den Abstand zwischen dem Zeitpunkt des Eintritts und dem Ende des Transits zu berechnen.
Um den dafür notwendigen Parameter l zu berechnen, muss man die Gleichung nach l umformen, indem man zuerst den Kehrwert von $\frac{P}{180°}$ mit D multipliziert. Danach wendet man für diese Faktoren den Sinus an, multipliziert den ganzen Term mit a und setzt die bekannten Werte für die Parameter ein, sodass sich letztendlich ein Wert in Kilometern für l ergibt:

$$D = \frac{P}{180°} \times \sin^{-1}\frac{l}{a}$$

$$\frac{180}{P} \times D = \sin^{-1}\frac{l}{a}$$

$$\sin\left(\frac{180}{P} \times D\right) = \frac{l}{a}$$

$$\sin\left(\frac{180}{P} \times D\right) \times a = l$$

$$l = \sin\left(\frac{180}{0.010403} \times 0.000204585\right) \times 6\,159\,579.28 = 380\,312 \text{ km}$$

Setzt man nun diesen Wert von l in Formel 6 ein und ergänzt erneut die bekannten Parameter P und a, so erhält man einen Wert für die Dauer der Bedeckung D in Jahren. Formt man diesen anschließend in Minuten um, indem man die Zahl mit 525 600 multipliziert, so ergibt sich:

$$D = \frac{0.010403}{180} \times \sin^{-1}\frac{380\,312}{6\,159\,579.28} = 0.000204585$$

$$0.000204585 \times 525\,600 = 107.53 \text{ min}$$

7.4 Vergleich der gemessenen Parameter

Tabelle 2: Vergleich zwischen Richtwerten und berechneten Ergebnissen; Richtwerte von http://www.exoplanet.eu/ und http://var2.astro.cz/

Parameter	Richtwert	Berechneter Wert
ΔF	0.024112	0.02472
Δm	0.0265	0.027177
i	87.04	87.0319
b	/	0.743818
D	107.83	107.53
a	0.04117	0.041174

Wie man anhand der Tabelle 2 sehen kann, stimmen die berechneten fast Werte mit den Richtwerten aus den Internetseiten überein. Gerade die Tiefe der Bedeckung **Δm** und die Dauer **D** sowie die Bahnneigung **i** und die Halbhauptachse **a** konnten sehr genau berechnet werden und passen in den angegeben Wertebereich der exoplanet.eu-Seite, der einen Spielraum von einem Bruchteil des Wertes beinhaltet. Während der berechnete Wert für die Bedeckungsdauer D sich nur um etwa 0.28% vom Richtwert unterscheidet, ist der Unterschied zwischen den in der Tabelle vorliegenden Messwerten für die Tiefe des Transits mit einer Abweichung von 2.5% schon etwas größer, was sich dadurch begründen lässt, dass der Wert für die Tiefe des Transits beziehungsweise der Intensitätsabfall nur sehr gering ist und somit schnell durch Rundungsfehler oder Rechnungen, die sehr kleine Zahlen mit vielen Nachkommastellen beinhalten, beeinflusst werden kann.
Des Weiteren ist davon auszugehen, dass auch die Richtwerte nicht hundertprozentig genau sein können, da es immer vorkommen kann, dass gerundete Ergebnisse oder Messungenauigkeiten an den verwendeten Instrumenten zu etwas verfälschten Werten führen, sodass ich mit diesem Ergebnis mehr als zufrieden sein kann, wenn man die unterschiedlichen Voraussetzungen betrachtet, unter denen wir diese Rechnungen durchgeführt haben.

R_p:	0.944 +/- 0.028 R_{Jup}	**$0.974\ ^{+0.015}_{-0.015}\ R_{Jup}$**
R_*:	0.617 +/- 0.013 R_{Sun}	*fixed, errors included in i*
A:	0.04117 +/- 0.00043 AU	*fixed, errors included in i*
Per:	3.799847 days	*fixed*
i :	87.04 +/- 0.084 °	**$86.90\ ^{+0.10\|0.31}_{-0.10\|0.29}$ °**

Abbildung 29: Vergleich der ETD-Richtwerte mit den aus der eigenen Beobachtung hervorgehenden Werten

Ein Vergleich mit Tabelle 2 zeigt, dass auch die Beobachtung des Exoplaneten und das darauffolgende Bildbearbeiten und Erstellen einer Lichtkurve sehr genaue Werte für den Planetenradius und die Bahnneigung geliefert haben, wobei die eigene Berechnung der Bahnneigung mithilfe der Richtwerte für die Himmelskörperradien und die Umlaufperiode sowie die Bedeckungsdauer natürlich noch etwas exakter ist und den eingetragenen Wert von 87.04° nur um etwa 0.0116% verfehlt.

8 Anhang

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Frühere Vorstellung unseres Sonnensystems; Quelle: http://www.bpb.de/ (Geschichte der Weltbilder) 3
Abbildung 2: Sternbild, in dem die Kepler-Mission durchgeführt wurde; Quelle: http://www.wikipedia.de/ (Kepler-Mission) 5
Abbildung 3: Ausrichtung des Teleskops der K2-Mission; Quelle: http://www.nasa.gov/ (K2-Mission) 7
Abbildung 4: Durch die Transitmethode aufgenommene Lichtkurve; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Transitmethode) 8
Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung eines Spektrums, hier: Frauenhoferlinien – Absorptionslinien im Spektrum der Sonne; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Frauenhoferlinien) 9
Abbildung 6: Polnisches 1.3 m Teleskop in der chilenischen Sternwarte „Las Campanas“; Quelle: http://www.wikipedia.org/ (Direkte Beobachtung) 10
Abbildung 7: Aufgenommenes Bild durch die direkte Beobachtungsmethode; Quelle: http://www.beltoforion.de/ (Methoden zur Exoplanetenentdeckung - Direkte Beobachtung) 10
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung des abgelenkten Lichtstrahls bedingt durch den Exoplaneten; Quelle: http://www.common.wikimedia.org/ (gravitational lens.gif) 11
Abbildung 9: Teleskop „Celestron 14 EdgeHD SCT“ 12
Abbildung 10: Transmissionskurven der Baader LRGBC Filter; Quelle: http://www.baader-planetarium.com/ 12
Abbildung 11: ETD Internetseite/Auflistung aller täglichen Transite 13
Abbildung 12: Darstellung des Exoplaneten HAT-54b im Computerprogramm Stellarium 14
Abbildung 13: Programm „10micron Keypad“ zur Steuerung der Kamera 14
Abbildung 14: Camera Control Programm 15
Abbildung 15: Bild des Sternhimmels mit markiertem Zentralstern HAT-P-54 in Maxim DL 15
Abbildung 16: Vergleich zwischen Rohbild von Darkframe (links) und Flatframe (rechts) 17
Abbildung 17: Auflistung aller Bilder in Muniwin 19
Abbildung 18: Kameraeinstellungen im Programm Muniwin 20
Abbildung 19: Einstellungen zur Lokalisation 20
Abbildung 20: Einstellungen zur Suche nach Sternen in den vorliegenden Aufnahmen 21
Abbildung 21: Einstellungen der Lichtkurve in Muniwin 21
Abbildung 22: Bild des Sternhimmels in Muniwin mit ausgewählten Vergleichs- und Checksternen 22
Abbildung 23: Lichtkurve in Muniwin 22
Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung eines Exoplanetentransits mit beschrifteten Parametern 23
Abbildung 25: Exoplanet.eu Internetseite mit Richtwerten für benötigte Parameter 24
Abbildung 26: ETD Seite mit weiteren Richtwerten für Parameter des Exoplaneten 24
Abbildung 27: Seitenansicht des Systems mit beschrifteten Parametern 30
Abbildung 28: Vogelperspektive der Konstellation von Exoplanet und Zentralstern mit beschrifteten Parametern 31
Abbildung 29: Vergleich der ETD-Richtwerte mit den aus der eigenen Beobachtung hervorgehenden Werten 34

8.2 Softwareverzeichnis

Anydesk (4.3 Verwendete Computerprogramme http://anydesk.com/)

Stellarium (4.2 Vorbereitungen zur Beobachtung http://stellarium.org/)

Maxim DL (4.3 Verwendete Computerprogramme http://diffractionlimited.com/)

Muniwin (6.1 Erstellen einer Lichtkurve http://c-munipack.sourceforge.net/)

SpecTrack (4.3 Verwendete Computerprogramme http://baader-planetarium.com/)

8.3 Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei unserem Kurslehrer, Herrn Koch, bedanken, der uns während des ganzen Jahres tatkräftig unterstützt hat und alles versucht hat, dass wir, trotz der schwierigen Situation, die durch viele Lockdowns und Homeschooling-Unterrichtsstunden geprägt war, die bestmögliche Erfahrung mitnehmen konnten. Nur durch sein Engagement und seine Hilfsbereitschaft konnten wir die Beobachtungen online mitverfolgen und durchführen und somit erste Eindrücke und Kenntnisse in der Wissenschaft der Astronomie sammeln.

Anschließend möchte ich mich auch bei Herrn Winkhaus bedanken, ohne dessen Bemühungen dieser Kurs in der Form nicht stattfinden könnte, und der sich seit Jahren um die Pflege der Teleskope und anderer Kursmaterialien kümmert.

In dem Zuge gilt mein Dank natürlich auch allen Spendern und Unterstützern der Sternwarte und des Projektkurses Astronomie am CFG.

Abschließend danke ich meiner Familie, die mich während des Verfassens meiner Projektarbeit stetig unterstützt hat.

8.4 Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich Linus Nothdurft, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, 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 Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

Linus Nothdurft:

Ort, Datum

Unterschrift