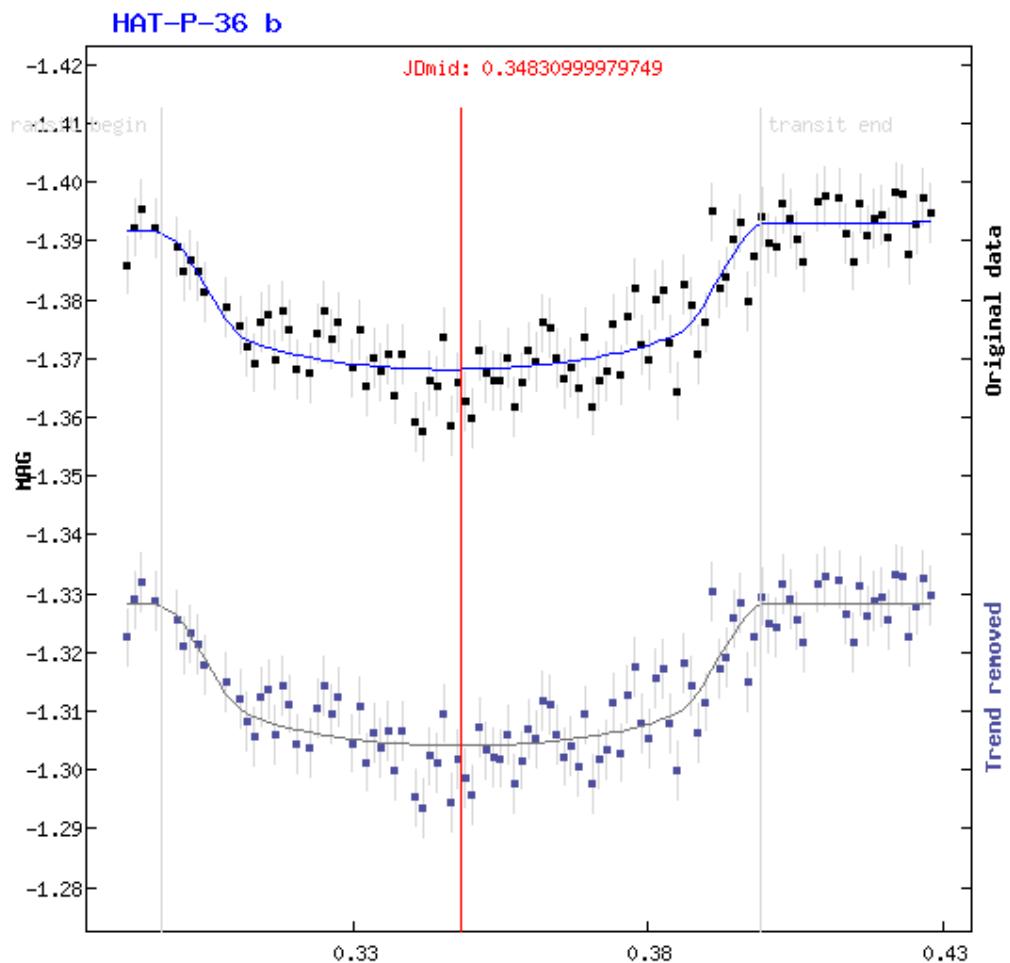


Exoplaneten

Nachweis von heißen Jupitern über die Transitmethode

Facharbeit im Fach Physik



Verfasserin: Vanessa Leuschner
zugehöriger Leistungskurs: 12 Physik
Kursleiter: Herr Hagedorn
mit Unterstützung von: Rüdiger de Boer, Markus Weber, Michael Kettler
von der Institution: Verein Sternwarte Trier e.V.
Abgabetermin: 15.05.2020

Kurzfassung

Entgegen der verbreiteten Annahme, Exoplaneten zu entdecken sei ausschließlich professionellen Astronomen möglich, wird die nachfolgende Arbeit zeigen, dass auch Amateure dazu durchaus in der Lage sind. Der Beweis dafür ist ein experimenteller Nachweis des Exoplaneten HAT-P 36b mit Amateurequipment, welcher nach einer theoretischen Einführung in die Erforschung von extrasolaren Planeten im Detail erläutert und ausgewertet wird.

Aus der Messung ergeben sich zwar durch Messungenauigkeiten von den Datenbanken abweichende Parameter, aber trotzdem ist zweifellos eine deutliche Helligkeitsänderung des Muttersterns zu erkennen, wie sie ein Transit hervorruft. Das zeigt, dass HAT-P 36b existiert, was reicht, um die zu Beginn aufgestellte Behauptung zu belegen. Darüber hinaus kann aber auch die Erweiterung des Datenpools um HAT-P 36b in der Wissenschaft von Nutzen sein, um die Parameter des Exoplaneten präziser zu bestimmen. Das wiederum zeigt, dass es Amateuren nicht nur möglich ist, Exoplaneten nachzuweisen, sondern auch einen essentiellen Beitrag zu der Wissenschaft zu leisten.

Eine Auseinandersetzung mit diesem Thema durch Jedermann ist daher sinnvoll, denn durch wechselseitige Zusammenarbeiten werden stets neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen oder alte wissenschaftliche Erkenntnisse bestätigt. Diese tragen ihrerseits maßgeblich dazu bei, dass die Erforschung von Exoplaneten eine immer größer werdende Wichtigkeit annimmt, weshalb sie in der Vergangenheit bereits zu einem dominanten Teilgebiet der modernen Astronomie geworden ist.

Abstract

This paper is devoted to proving that, contrary to the common misconception that only professional astronomers are able to detect exoplanets, amateur astronomers can do so too. As evidence, I have conducted an experimental verification of HAT-P 36b with ordinary equipment which will be presented in detail after an initial introduction into the theoretical aspects of exoplanet research.

Although the calculated parameters deviate significantly from the databases' values due to measuring inaccuracies, there is without a doubt a considerable change in the brightness of HAT-P 36b's host star as caused by a transit. This demonstrates the existence of the extrasolar planet and thereby sufficiently supports my claim that amateur astronomers can detect exoplanets. Moreover, compiling more data concerning HAT-P 36b using conventional means can be of great use to scientists, as these additional datasets aid in calculating the exoplanet's parameters with higher precision. This shows that amateurs are not only capable of discovering exoplanets themselves, but also contribute to science in general.

Therefore, engaging in exoplanet research is mutually profitable, as cooperation between amateurs and professionals enhances both the gaining of new insights and the confirmation of existing knowledge. These findings then contribute significantly to the increasing importance of exoplanet research, which has already become a dominant sector of modern astronomy in recent decades.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Allgemeines	1
2.1. Definition Planet	1
2.2. Definition Exoplanet	2
2.3. Gründe für die Suche nach Exoplaneten	2
2.4. Heiße Jupiter	2
3. Entdeckungsmethoden professioneller Astronomen	3
3.1. Direktmethode	3
3.2. Lichtlaufzeitmethode	4
3.3. Microlensing	4
3.4. Astrometrie	4
3.5. Radialgeschwindigkeitsmethode / Dopplermethode	4
3.6. Transitmethode	5
4. Arbeitsweise von Amateuren: Transitmethode	5
4.1. benötigte Ausrüstung	5
4.2. Vorbereitung	7
4.2.1. Zielstern (HAT-P 36)	7
4.2.2. Beispielplanet (HAT-P 36b)	8
4.3. Durchführung	8
4.4. Auswertung (Helligkeitskurve)	10
5. Berechnungen	13
5.1. Transittiefe	14
5.2. Planetenradius	14
5.3. Umlaufzeit	15
5.4. große Bahnhalbachse	15
5.5. Impact-Faktor	15
5.6. Transitdauer	16
6. Vergleich	18
7. abschließende Betrachtung	19
8. Abschlußerklärung	20
Anhang	21
9. weitere Bilder	21
10. Verzeichnis	24
10.1. Literaturverzeichnis	24
10.2. Abbildungsverzeichnis	30

1. Einleitung

Ziel dieser Facharbeit ist in erster Linie, mit mäßigen Mitteln die Existenz eines ausgewählten Exoplaneten nachzuweisen, um so die Fragestellung zu beantworten, inwiefern sich Amateurastronomen sinnvoll an der Forschung beteiligen können. Als Mitglied der Astronomie AG des Vereins Sternwarte Trier e.V. würde ich mich selbst auch als Hobby-Astronomin beschreiben, was einerseits meine Motivation hinter der Themenwahl erklärt und andererseits die Voraussetzung dafür ist, dass ich diese Facharbeit überhaupt anfertigen kann. Für die Messung selbst habe ich nämlich die freundliche Unterstützung von Markus Weber und Michael Kettler des Vereins Sternwarte Trier e.V. in Anspruch genommen, die mich auch bei der weiteren Anfertigung der Facharbeit betreut haben.

Gegenstand des ersten Teils meiner Arbeit ist zunächst eine Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen der Exoplanetenforschung. Dieses Basiswissen umfasst dabei sowohl die in Kapitel 2 erläuterte festgelegte Definition und wissenschaftliche Motivation hinter der Erforschung von Exoplaneten, als auch die in Kapitel 3 erklärten verschiedenen Methoden der Detektion.

Im zweiten Teil folgt dann das praktische Erstellen einer Helligkeitskurve nach dem standardmäßigen Versuchsablauf, bestehend aus der in Kapitel 4 protokollierten Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Transits von HAT-P 36b und der in Kapitel 5 angestellten Berechnungen. Den Abschluss macht in Kapitel 6 ein Vergleich zwischen meinen Messergebnissen und den Werten aus der Datenbank, auf deren Gegenüberstellung die abschließende Betrachtung aus Kapitel 7 basiert.

2. Allgemeines

2.1. Definition Planet

Nach Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) ist ein Himmelskörper seit der Generalversammlung 2006 über folgende vier Charakteristika als Planet definiert: Erstens muss er sich auf einer Umlaufbahn um einen Stern bewegen. Zweitens muss er über genügend Masse verfügen, um durch das hydrostatische Gleichgewicht zwischen seinem eigenen Innendruck und der Gravitationskraft seiner einzelnen Schichten über eine beinahe runde Form zu verfügen. Drittens muss er die Umgebung seiner Bahn geräumt haben, also das bestimmende Objekt dort sein. Und viertens darf er kein Mond sein, also nicht sowohl um einen Stern als auch um einen anderen Himmelskörper kreisen. ^[1]

2.2. Definition Exoplanet

Planeten „außerhalb des vorherrschenden gravitativen Einflusses der Sonne, aber innerhalb des [vorherrschenden] gravitativen Einflusses eines anderen Sterns“ ^[2], bezeichnet man als Exoplaneten. Alternativ kann auch die Bezeichnung extrasolarer Planeten verwendet werden, da sie nicht unserem Sonnensystem angehören, sondern einem anderen Planetensystem.

2.3. Gründe für die Suche nach Exoplaneten

Obwohl man den ersten Exoplaneten ^[3] wahrscheinlich schon vor mehr als 100 Jahren mit spektroskopischen Messungen entdeckte, erkannte man ihn damals nicht als solchen. Daher liegt die erste bestätigte Entdeckung eines Exoplaneten erst 25 Jahre zurück, doch trotzdem konnten durch intensive Forschung auch in so einer kurzen Zeit bis heute mehr als 4.000 solcher Planeten entdeckt werden. ^[4] Die große und täglich steigende Zahl lässt deshalb die Frage auftreten nach den Gründen für das wissenschaftliche Interesse an Exoplaneten. Die Antwort ist vielseitig, denn einerseits gibt die Erforschung anderer Planetensysteme Aufschluss über die verschiedenen Entstehungsprozesse und Zustände im Universum, andererseits liefert sie eventuell irgendwann Hinweise auf Leben außerhalb unseres Sonnensystems. Denn die Überlegung ist: „Wenn unser Sonnensystem nicht einzigartig ist, dann ist es höchstwahrscheinlich unsere Erde ebenso wenig - und damit auch jenes Phänomen, das wir Leben nennen“ ^[5]. Bislang bewahrheitet sie sich allerdings nicht. Unser Sonnensystem hat mit den meisten untersuchten Planetensystemen nämlich reichlich wenig Ähnlichkeit: es weist die gleiche Anzahl großer und kleiner Planeten auf, während sonst eines von beidem häufiger vertreten ist; es beheimatet keine Supererden, die sonst in größter Zahl bei sonnenähnlichen Sternen vorkommen; und es besitzt keine Planeten innerhalb der Merkurbahn, während Planeten in diesem Bereich sonst keine Seltenheit sind. ^[6]

2.4. Heiße Jupiter

Meist stellen solche Planeten in unmittelbarer Nähe zu einem Stern Gasriesen dar – das sind dann sogenannte heiße Jupiter. Der Name an sich verrät ihre wichtigsten Eigenschaften: eine Masse ähnlich der des Jupiters ^[7] und ein so geringer Abstand zu ihrem Zentralstern, dass ihre Oberfläche sehr stark aufgeheizt wird. ^[8] Für einige bedeutet das eine Distanz von nur einem Sternradius. ^[9] Die Entstehung von Riesenplaneten in dieser Nähe ist physikalisch jedoch kaum möglich, denn dort gibt es einerseits nicht genug Zeit und andererseits nicht genug Materie, als dass jupitergroße Himmelskörper geformt werden könnten. ^[10] Nur „jenseits der sogenannten Schnee- oder Frostgrenze“ in den „kühlten Außenbereichen der protoplanetaren Scheibe“, der Staubplatte um einen jungen Stern, können Gasriesen entstehen. ^[11] Dass trotzdem heiße Jupiter existieren, und zudem nicht selten sind, versucht die Migrationstheorie zu erklären, nach der sich ein Riesenplanet durch die Wechselwirkung mit der restlichen

Materie um seinen Stern zu diesem hinbewegt (und gegebenenfalls wieder von ihm weg, was bei unserem Jupiter geschehen sein könnte). ^[12] Auf diese Weise, vermuten Wissenschaftler, sind die Planeten entstanden, die wir als heiße Jupiter kennen und die durch ihre beiden Kennmerkmale noch weitere Charakteristiken aufweisen.

Manche Eigenschaften begünstigen stark die Entdeckung solcher heißen Jupiter mit heutigen Suchmethoden. Aufgrund ihrer engen Bahn um ihren Zentralstern wirken extreme Gezeitenkräfte auf die Planeten, ^[13] die ihrerseits jedoch auch eine starke Gravitationskraft auf den Stern ausüben. Bei einer Messung mit der Radialgeschwindigkeitsmethode (→ 3.5.) rufen heiße Jupiter deshalb eine „starke und schnelle Oszillation des Zentralgestirns“ ^[14] und eine große „periodische Änderung in der Radialgeschwindigkeitssignatur“ ^[15] hervor. Auch beträgt die Umlaufzeit von Planeten dieses Typs nur etwa ein bis fünf Tage. ^[16] Wegen dieser kurzen Periodendauer können bei einer Untersuchung mit der Transitmethode (→ 3.6.) in kurzen Zeiträumen viele Beobachtungen erfolgen, die essenziell für den Nachweis von Exoplaneten sind. Denn um sicherzugehen, dass die Helligkeit eines Sterns nicht nur einer natürlichen Schwankung unterliegt, muss ihre Änderung periodisch auftreten. ^[17] Der geringe Abstand und die großen Maße der heißen Jupiter führen außerdem dazu, dass die Scheiben dieser Planeten verglichen mit anderen Himmelskörpern einen relativ großen Anteil an der Scheibe des Sterns ausmachen und so eine vergleichsweise starke Helligkeitsabdunkelung verursachen. ^[18] Allgemein gilt, dass mit zunehmender Größe des Transitobjektes auch die Abschwächung des Sternenlichts zunimmt. ^[19] Aus diesen Gründen stellen heiße Jupiter den am häufigsten dokumentierten Planetentyp dar und sind für Profis und Amateure gleichermaßen nachweisbar.

3. Entdeckungsmethoden professioneller Astronomen

Techniken, um Exoplaneten aufzuspüren, gibt es viele. Da aber jede Methode von unterschiedlichen Parametern wie Distanz oder Bahnneigung abhängt, gibt es keine Methode, mit welcher jeder Planet entdeckt oder alle Planeteneigenschaften ermittelt werden können, die Astronomen gerne kennen würden (Masse, Radius, Halbachse, Achsenneigung, Umlaufzeit, Rotationszeit, Atmosphärenzusammensetzung, Oberflächenbeschaffenheit, Material). Um die besten Ergebnisse zu erhalten, kombinieren Profiastronomen deshalb die unterschiedlichsten Techniken, welche nachfolgend näher erläutert werden. ^[20]

3.1. Direktmethode

Um Fotoaufnahmen von Exoplaneten zu machen, schattet man im Teleskop das Licht des Zielsterns durch eine Blende ab und beobachtet diesen zudem im infraroten Bereich, da hier der Kontrast zwischen dem Stern und dem ihn begleitenden Exoplaneten deutlicher ist als im sichtbaren Spektrum. ^[21] Auf diesem direkten Weg ist die Bestimmung der Merkmale eines

Exoplaneten auf so große Distanzen allerdings kaum möglich, daher wird meist versucht, auf indirektem Weg an möglichst viele Daten zu kommen. ^[22]

3.2. Lichtlaufzeitmethode

Für den Nachweis von Exoplaneten kann sich der Lichtlaufzeit bedient werden, also der Zeit, „die das Licht zum Durchlaufen einer bestimmten Strecke benötigt“ ^[23]. Begleitet ein Planet einen Stern, so bewegen sich beide um den gemeinsamen Massenschwerpunkt des Systems, das Baryzentrum ^[24], weshalb es zu einer zeitlichen Verschiebung der vom Stern ausgehenden Signale kommt. ^[25]

3.3. Microlensing

Gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie verbiegt ein Körper mit seiner Masse und somit seiner Gravitation den Raum um ihn herum und beugt an ihm vorbeigehendes Licht. ^[26] Somit dient er als sogenannte Gravitationslinse. Wird also ein weiter entfernter Stern von einem Stern in geringerer Entfernung passiert, so wird durch das Gravitationsfeld des vorderen Sterns das Licht des hinteren gekrümmt. ^[27] Bei einer Helligkeitsmessung des Transitsterns während des Vorüberziehens vor dem Hintergrundstern nimmt seine Helligkeit für gewöhnlich zu Beginn systematisch zu, erreicht in der Mitte ihr Maximum und fällt gegen Ende wieder ab. ^[28] Es gilt nun aber: „Falls ein Planet den Vordergrundstern begleitet, macht er in der aufgezeichneten Helligkeitskurve [als charakteristische Spitze] bemerkbar“. ^[29]

3.4. Astrometrie

Da nicht nur ein Zentralgestirn durch seine Gravitation eine Auswirkung auf seine Begleiter hat, sondern der Planet durch seine Gravitation auch eine Auswirkung auf sein Zentralgestirn, erscheint es so, als bewege sich der Stern vor dem Hintergrund anderer Sterne. ^[30] Diese Bewegung eines Sterns wird bei der Astrometrie über eine längere Zeit hinweg exakt aufgezeichnet und die „Ablenkung von der vorhergesagten Bewegung ausgewertet“. ^[31]

3.5. Radialgeschwindigkeitsmethode / Dopplermethode

Denselben Effekt, der bei der Lichtlaufzeitmethode und der Astrometrie Grundlage ist, macht sich die Radialgeschwindigkeitsmethode zu Nutze: die Bewegung des Sterns um das Baryzentrum. Bei einem Blick von der Erde seitlich auf die Bahn eines Sterns zeigt seine periodische Bewegung „einen Teil, der genau in Sichtrichtung des Beobachters liegt“ ^[32], die Radialgeschwindigkeit. Unter Zuhilfenahme diverser Techniken der Spektroskopie wird diese Bewegungsgeschwindigkeit des Sterns auf uns zu oder von uns weg gemessen. ^[33] Da gemäß des Dopplereffekts die Bewegung einer Strahlungsquelle eine Änderung der Frequenz nach sich zieht, erfährt das Spektrum eines Sterns bei Annäherung eine Blauverschiebung und bei

Entfernung eine Rotverschiebung. ^[34] Durch die graphische Darstellung der Daten, aufgetragen gegen die Zeit, lässt sich dann die Existenz eines Planeten erkennen. ^[35]

3.6. Transitmethode

Der Begriff des Transits bezeichnet das Vorüberziehen eines Objektes vor einem anderen. Bei Helligkeitsmessungen hat ein solches Vorüberziehen immer eine Helligkeitsänderung zur Folge, weil das Licht des hinteren Himmelskörpers von dem vorderen stellenweise abgeschirmt wird. Der Transit eines dunkleren Planeten vor einem hellen Stern macht sich also in einem „geringen Abfall der aufgezeichneten Helligkeit“ ^[36] bemerkbar.

Dies läuft wie folgt ab:

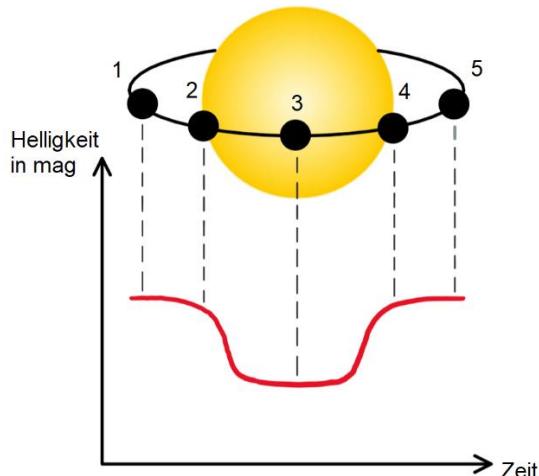


Abbildung 1 Zusammenhang zwischen Transitposition und Helligkeit

In der ersten Position tritt der Planet auf seiner Umlaufbahn hinter seinem Stern hervor. In der zweiten Position drängt sich der Planet zwischen die Sternscheibe und den Beobachter, was ein Absinken der Helligkeitskurve zur Folge hat. In der dritten Position läuft der Planet vor seinem Zentralgestirn vorbei und die Abdunkelung des Sterns erreicht in der Mitte ihr Maximum, die Helligkeitskurve ihr Minimum. In der vierten Position tritt der Planet schließlich wieder aus dem Sichtfeld aus, was ein Ansteigen der Helligkeitskurve zur Folge hat. In der fünften Position bewegt sich der Planet weiter auf seiner Umlaufbahn, bis er erneut hinter dem Stern verschwindet.

4. Arbeitsweise von Amateuren: Transitmethode

4.1. benötigte Ausrüstung

Um einen Transit aufzunehmen, bedarf es sowohl der geeigneten Hardware als auch der richtigen Software. Hardwaretechnisch benötigt man vor allem eine CCD-Kamera (in unserem Fall die Moravian G2-8300 FW) wegen der besonderen Lichtempfindlichkeit ihres Sensors sowie ein Teleskop mit einer Nachführkontrolle. Während wir die ersten Probemessungen (→ Ergebnis im Anhang (Abb. A5)) mit dem Takahashi TSA102 Refraktor des Vereins Sternwarte Trier e.V. in Irsch durchgeführt haben, sind die in dieser Arbeit verwendeten Daten aufgrund der Covid-19-Krise mit Herrn Webers Newton Teleskop entstanden, dessen Optik von Orion

UK stammt und auf eine Gabelmontierung mit Schrittmotorsteuerung montiert ist. Dieser Reflektor hat einen Durchmesser von 300mm und eine Brennweite von 1170mm, was zu einem hohen Öffnungsverhältnis von $f/3,9$ führt.

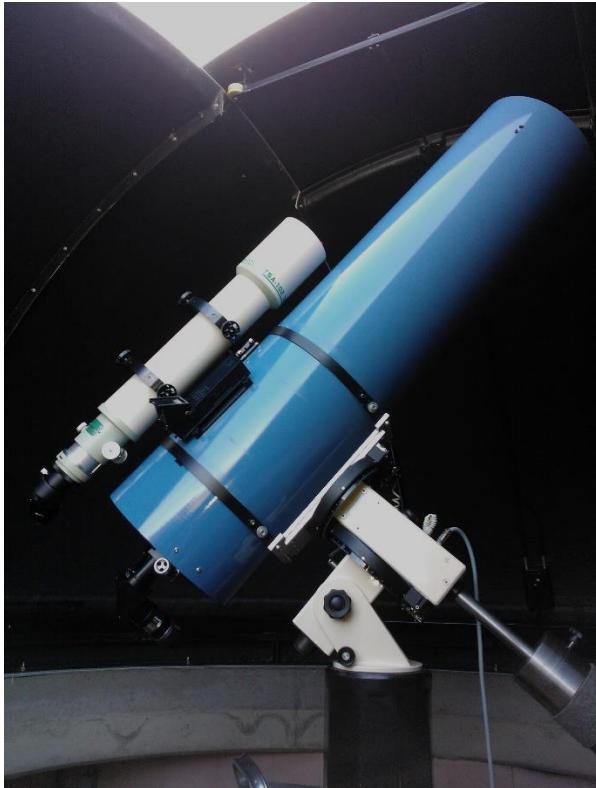


Abbildung 2 Takahashi-Refraktor



Abbildung 3 Newton-Teleskop

Hinzu kommt jedoch noch ein Bildkorrektor (Flattener) von TeleVue, durch dessen Brennweitenverlängerungsfaktor von 1,15 die Brennweite auf $1,15 \cdot 1170\text{mm} = 1345\text{mm}$ gestiegen ist. Eine Bildkorrektur ist deshalb von Nöten, weil viele Teleskope gewölbte Bildfelder haben, der Sensor beim Fotografieren jedoch eben ist. Ohne die Korrektur wären die Aufnahmen am Rand weniger scharf als in der Mitte, doch durch den Flattener^[37] zwischen der Kamera und dem Okularauszug wird das Bildfeld geebnet und so eine optimale Projektion erreicht. Die Nachführung erfolgte über einen Off-Axis Guider, der das Licht über ein kleines Seitenprisma direkt vor der CCD-Kamera in die Nachführkamera (Moravian G1-300) leitet. Außerdem braucht man einen Luminanzfilter (hier ein Astronomik CLS-Filter), der alle Wellenlängen gleichermaßen durchlässt, und eine Bahtinov-Maske als Scharfstellhilfe. Für die Flat Fields am Ende empfiehlt sich ein Flat Field Generator, eine LED-Lampe oder eine Leuchtfolie, alternativ geht aber auch ein Tablet mit reinweißem Hintergrund.

Als Software kommen verschiedene Programme in Frage, wir verwenden SIPS^[38] (Scientific Image Processing System) für die Kontrolle der Kamera und der Nachführung, für das Scharfstellen und für die Belichtungsreihen; Guide als digitale Sternenkarte; und Muniwin zur Bildreduzierung, zur Flat-Field- sowie Dark-Frame-Korrektur und zur Erstellung der Helligkeitskurve.

4.2. Vorbereitung

Eine Messung nimmt in der Regel um die 6 Stunden einer Nacht in Anspruch. Das umfasst eine Stunde Vorbereitung, eine halbe bis eine Stunde Messung vor Beginn des Transits, ein paar Stunden Messung während der gesamten Dauer des Transits, eine halbe bis eine Stunde Messung nach Ende des Transits und eine Stunde Nachbereitung für die Dark Frames (Dunkelbilder), Flat Fields (Weißbilder) und den Abbau. Daher ist die richtige Vorbereitung entscheidend, um nicht hinterher feststellen zu müssen, dass sich die Zeit und die Mühe gar nicht gelohnt haben.

Es gilt also erst einmal, sich einen Exoplanetentransit herauszusuchen, der nach Möglichkeit alle Kriterien des Teleskops und der Umgebung erfüllt, die in unserem Fall wären: eine Helligkeit besser als 13 mag, eine Helligkeitsabnahme von über 0,02 mag und kein Störlicht in unmittelbarer Nähe zum Stern (zum Beispiel durch einen aufgehenden Mond), sowie natürlich Zeiten nach Sonnenuntergang, eine Position über dem Horizont und einen Verlauf des Transits, der kein Umschwenken des Teleskops erfordert.

In der „Exoplanet Transit Database“ ^[39] (ETD) kann man nach solchen Kandidaten suchen. Gut geeignet sind Exoplaneten des Typs HAT-P und WASP, weil es sich bei ihnen um heiße Jupiter handelt. Um den richtigen auszuwählen, kann man sich mehr Details zu den einzelnen Planeten anzeigen lassen. Dazu gibt man die Koordinaten des Beobachtungsstandortes ein und lässt sich die Vorhersagen für die nächsten Tage angeben. In der Liste enthalten sind Informationen zu den Zeiten des Beginns, des Zentrums und des Endes des Durchgangs, sowie Angaben dazu, ob der Transit gut beobachtbar ist oder nicht (wegen Tageslicht oder einer Position unter 20° am Himmel).

4.2.1. Zielstern (HAT-P 36)

Die Kriterien hat in der Nacht vom 18. März 2020 auf den 19. März 2020 der Stern HAT-P 36 ^[40] mit seinem Begleiter HAT-P 36b erfüllt. Dieser Zielstern liegt im Sternbild Canes Venatici (CVn), zu Deutsch Jagdhunde, einem kleinen „Sternbild des Nordhimmels, etwas südlich des Großen Wagens“ ^[41], unterhalb seiner Deichsel. Während seine scheinbare Helligkeit 12,26 mag beträgt, liegt seine absolute Helligkeit bei 4,96 mag. Damit wird er, genau wie unsere Sonne, klassifiziert als Stern der Spektralklasse ^[42] G, deren Angehörige farblich gelb erscheinen und zur besseren Unterscheidung noch in Unterklassen von 0 bis 9 aufgeteilt werden (wobei Sterne der Unterkategorie G0 am heißesten sind und Sterne der Unterkategorie G9 am kühlest). Die Sonne ist vom Typ G2, während HAT-P 36 vom Typ G6 ist. Somit ist sofort ersichtlich, dass die Sonne mit ihren 5778 K heißer ist als HAT-P 36, der eine Oberflächentemperatur von 5580 K aufweist. Verglichen mit der Sonne hat HAT-P 36 jedoch eine um den Faktor 1,022 größere Masse und einen um den Faktor 1,096 größeren Radius.

Er befindet sich außerdem in einer Entfernung von etwa 939,93 Lichtjahren (288,2 pc) von uns und besitzt nur den einen bekannten extrasolaren Begleiter, HAT-P 36b.

4.2.2. Beispielplanet (HAT-P 36b)

Der Exoplanet HAT-P 36b ^[43] wurde 2012 durch das HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) Projekt über die Transitmethode entdeckt. Zu seinen Eigenschaften gehören ein Radius von 1,264 Jupiterradien oder 14,17 Erdradien sowie eine Masse von 1,832 Jupitermassen oder 582 Erdmassen. Da die große Halbachse seines Orbits 0,0238 AE beträgt, ergibt sich eine Umlaufzeit von 1,327 Tagen. Das alles macht ihn zu einem geeigneten Kandidaten für Amateurastronomen, die selbst die Transitmethode anwenden möchten, denn vor seinem Stern ruft er laut Datenbank eine Verdunkelung von 0,0204 mag hervor.

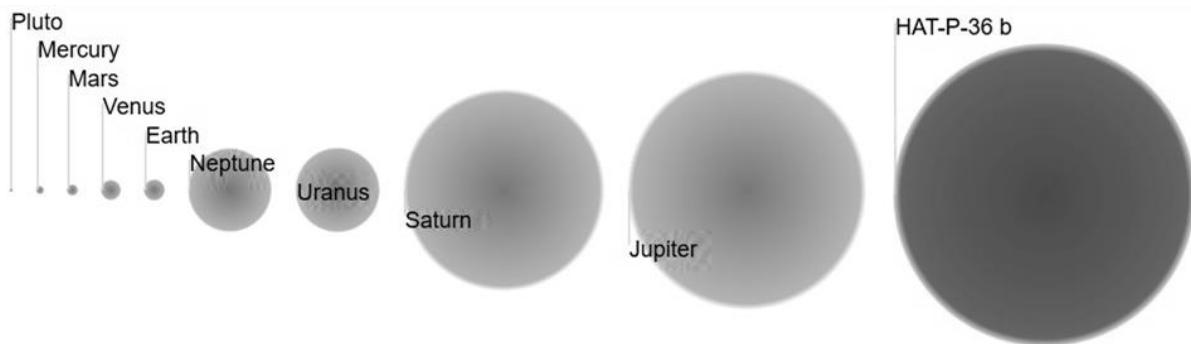


Abbildung 4 Größenvergleich unseres Sonnensystems mit HAT-P 36b

4.3. Durchführung

Um überhaupt eine Messung durchführen zu können, muss die CCD-Kamera mit ihrem entsprechenden Abstandshalter erst einmal auf das Teleskop montiert und an dieses angeschlossen werden. Erst wenn die Verbindung ordnungsgemäß hergestellt wurde, beginnt die eigentliche Durchführung der Messung, die ihrerseits jedoch auch noch einiges an Vorbereitung erfordert.

Zuerst wird mit SIPS die Kühlung der Kamera von ihrer aktuellen Temperatur runtergekühlt auf etwa (-20)°C. An einem hellen Stern stellt man anschließend die Kamera scharf. Dazu verwendet man eine Bahtinov-Maske als Scharfstellhilfe, indem sie vor das vorderste optische Element des Teleskops gelegt wird und über ihre Schlitzöffnungen im Blickfeld ein strahlenförmiges Muster erzeugt. ^[44] Für ein optimal scharfes Bild muss der längste Strich die x-förmig angeordneten anderen beiden genau halbieren.

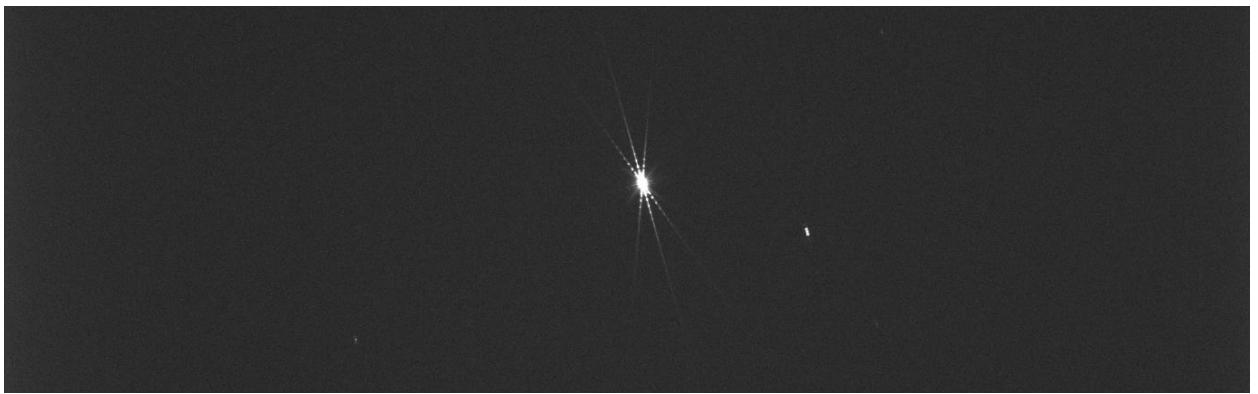


Abbildung 5 Blick durch die Bahtinov-Maske

Damit der Scharfstellvorgang nicht zu lange dauert, verwendet man idealerweise eine Belichtungszeit von einer Sekunde und lässt sich die Bilder im Vorschaumodus anzeigen, damit sie schneller heruntergeladen werden. Ist man mit der Einstellung zufrieden, muss man daran denken, die Bahtinov-Maske auf jeden Fall wieder abzunehmen.

Dann gilt es, das Teleskop auf einen Referenzstern auszurichten, also auf einen Stern, dessen Koordinaten genau bekannt sind, sodass über ihn der zu beobachtende Stern eine eindeutige Position in einem Koordinatensystem erhält [45]. Von diesem Referenzstern aus kann mit „Guide“ dann automatisch zu einem Stern in der Nähe des Objektes gefahren werden. Um sicherzugehen, dass alles richtig kalibriert ist, empfiehlt es sich, jetzt noch einmal zu einem anderen Stern zu fahren.

Wenn das Teleskop dort richtig ankommt, lässt man das Teleskop schließlich zum eigentlichen Objekt, dem Zielstern, fahren. Dazu gibt man die Werte für die Rektaszension und die Deklination, welche man aus der ETD erhalten hat, in „Guide“ ein.

Über eine Aufnahme, die man dort mit einer Belichtungszeit von 10 Sekunden macht, sucht man auf dem Bild schließlich den Stern. Dieser Arbeitsschritt ist der zeitaufwändigste. Einem steht zwar ein Vergleichsbild aus der ETD zur Verfügung, die Kamera kann aber anders ausgerichtet und das Foto somit gedreht sein.

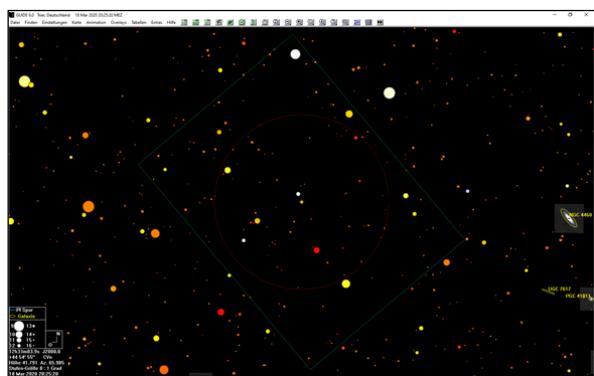


Abbildung 6 Ausschnitt der Sternenkarte "Guide"



Abbildung 7 Fotoaufnahme mit der CCD-Kamera

Hat man schließlich nach einiger Zeit und idealerweise in Teamarbeit mit mehreren Personen eindeutig das Zielobjekt auf der Aufnahme gefunden, misst man dessen Helligkeit. Der Stern darf nämlich nicht gesättigt sein, also nicht vollständig weiß sein, das heißt keinen Wert von (über) 65 536 haben. Stattdessen sollte die Helligkeit etwa die Hälfte dieses Wertes betragen.

Ist das der Fall, wird der Autoguider gestartet, also die automatische Nachführkontrolle, welche elektronisch in die Steuerung des Nachführmotors eingreift [46]. Dann kann der Beginn der Aufnahmesequenz eingeleitet werden, sodass in regelmäßigen Zeitabständen (bei HAT-P 36b alle 90 Sekunden) je eine Aufnahme gemacht wird. Dabei sollte wie bereits erwähnt (→ 4.1.) ein Luminanzfilter verwendet werden, der alle Wellenlängen gleichermaßen durchlässt. Bei diesen Aufnahmen ist es wichtig, schon eine halbe bis eine Stunde vor dem eigentlichen Durchgang anzufangen und erst eine halbe bis eine Stunde nach dem eigentlichen Durchgang aufzuhören, um später eine schöne Helligkeitskurve zu erhalten. Unsere Messung hat gegen 19:50 Uhr begonnen und gegen 23:10 Uhr geendet, wobei der Transit laut ETD von 20:19 Uhr bis 22:32 Uhr ging und sein Zentrum um 21:26 Uhr hatte (Zeiten nach MEZ).

Für die Kalibrierung der Kurve sind außerdem Dark Frames und Flat Fields von Nöten. Diese müssen unter denselben Bedingungen (gleiche Belichtungszeit, gleiche Betriebstemperatur) aufgenommen werden. Die Dark Frames erhält man, indem man mehrere Aufnahmen mit aufgesetztem Deckel macht, idealerweise 5 bis 10, damit dann später die Rauschpunkte gemittelt werden können. Für die Flat Fields gilt ebenfalls, mehrere Aufnahmen zu machen, wobei hierfür einen Flat Field Generator, eine spezielle LED-Lampe oder eine Leuchtfolie verwendet wird. Das Hilfsmittel sollte dimmbar sein, um wieder nur die Hälfte der Sättigung zu erreichen. Ist all das getan, kann nach einigen Stunden abgebaut und ausgewertet werden.

4.4. Auswertung (Helligkeitskurve)

Bei einer Helligkeitskurve werden die Werte für die Helligkeit des beobachteten Objektes in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen. Somit wird die Helligkeit zu einer Funktion der Zeit. Die Erstellung einer solchen Kurve, ausgehend von einer Belichtungsreihe, lässt sich in drei aufeinanderfolgende Schritte unterteilen: das Erstellen eines neuen Projektes, die Reduktion der Einzelbilder und die Auswahl der Sterne sowie der Apertur (Blendenöffnung).

Zuerst erstellt man ein neues Projekt, welches man mit den Aufnahmen füllt, die man für die Auswertung heranziehen möchte. Außerdem erstellt man über die entsprechende Funktion des Programms einen „master dark frame“ (→ Anhang Abb. 1a-4a) als Mittelung aus allen Dark Frames und einen „master flat field“ (→ Anhang Abb. 1b-4b) als Mittelung aus allen Flat Fields, um das Bildrauschen später bestmöglich reduzieren zu können.

Bei der anschließenden Reduktion handelt es sich um einen Prozess, der seinerseits aus den vier Vorgängen der Konvertierung, der Kalibrierung, der Fotometrie und des Matchings

besteht. Obwohl diese Schritte einzeln durchgeführt werden können, empfiehlt es sich, alle gemeinsam auszuführen, wozu die Funktion der „Express Reduction“ dient.

Im Schritt der Konvertierung erstellt Muniwin eine Kopie der CCD-frames, was von Nöten ist, weil sie im weiteren Verlauf verändert werden, aber die Ausgangsdaten für eine eventuell anderweitige Verwendung gleichbleiben sollten.

Durch die Kalibrierung werden diejenigen Komponenten eines CCD-frames entfernt, die das Ergebnis der nachfolgenden Fotometrie in unerwünschter Weise beeinflussen könnten. Zu den drei zu entfernenden Hauptkomponenten einer Rohaufnahme zählen der Strom aus einfallendem Licht, der Strom durch den thermischen Drift von Elektronen (Dunkelstrom) und der konstante Vorspannungspegel (eine „permanent angelegte elektrische Grundspannung“, Bias) [47]. Die Bildsensorkalibrierung, welche die Effekte dieser Komponenten reduziert, ist ein „zweistufiger Korrekturprozess“ mit Hilfe der Dunkelbilder (dark frames) und der Weißbilder (flat fields). [48]

Da die einzelnen Pixel einer CCD-Kamera unterschiedlich stark auf Temperatureinflüsse reagieren, erzeugt für eine bestimmte Temperatur jedes Pixel einen anderen Strom für Schwarz. Während der Dark-Frame-Korrektur der Standardkalibrierung mit dem „master dark frame“ wird das aus dem Dunkelstrom hervorgegangene Bildrauschen entfernt, indem das Dunkelbild vom Rohbild abgezogen wird. [49]

Da der Sensor einer Verunreinigung durch Staub ausgesetzt ist, die einzelnen Pixel durch den Fertigungsprozess natürlicherweise über eine ungleichmäßige Empfindlichkeit verfügen und in der Optik Vignettierung auftreten kann, kommt es zudem zu Helligkeitsunterschieden im Bild.

Während der Flat-Field-Korrektur mit dem „master flat field“ wird diese Ungleichförmigkeit ausgeglichen, indem das Rohbild, von dem das Dunkelbild bereits abgezogen wurde, durch das Weißbild dividiert wird. [50]

Anschließend folgt die Fotometrie, die auf jedem Bild die Anzahl der Sterne mitsamt ihrer Intensität bestimmt, und das Matching, welches zwischen den Aufnahmen im Datensatz einander entsprechende Sterne findet. Für letzteres ist es von Nöten, einen Bezugsrahmen (reference frame) festzulegen. Dafür eignet sich meistens derjenige mit der größten Anzahl an Sternen. In wenigen Einzelfällen ist die Verarbeitung einer Einzelaufnahme nicht möglich, wenn beispielsweise ein Wolkenschleier die Aufnahme beeinflusst hat. Diese Bilder werden von Muniwin einfach außen vorgelassen. Aus allen anderen Aufnahmen kann dann aber problemlos eine Helligkeitskurve erstellt werden.

Zu Erstellung der Helligkeitskurve müssen aus denen von Muniwin rausgesuchten Sternen nun drei verschiedene Arten ausgewählt werden: ein variabler Stern (variable star, markiert in

rot), dessen Helligkeit sich ändert, weil der Exoplanet seine Scheibe passiert hat; ein Vergleichsstern (comparison star, markiert in grün), dessen Helligkeit konstant ist und mit der des variablen Sterns verglichen wird; und ein oder mehrere weitere Vergleichssterne (check stars, markiert in blau), die in ihrer Helligkeit ebenfalls konstant sein sollten und sich somit zur Überprüfung eignen.

Als letztes ist die Apertur zu wählen. Diese ist im Prinzip eine Blende, die man auf einen Stern legt, um dessen Helligkeit zu messen. Alle Pixel, die sich innerhalb der Öffnung dieser Blende befinden, werden in die Berechnung einbezogen, weshalb die beste Apertur groß genug ist, um das meiste Licht des Sterns aufzunehmen, aber klein genug, um so wenig Hintergrund wie möglich zu enthalten. Muniwin schlägt einem eine Reihe vordefinierter Öffnungen mit einem Radius im Bereich von 2 bis 30 Pixeln vor, von denen wiederum jeweils ein Diagramm die Standardabweichung der Daten anzeigt. Jede der Kurven für jede Apertur hat gewöhnlich eine parabelartige Form und die beste Apertur davon liegt genau im Tiefpunkt des Graphen. Damit hat das Programm genug Informationen, um automatisch eine Helligkeitskurve zu erstellen, bei der jeder Messwert von einem Toleranzbalken begleitet wird, welcher Messungenauigkeiten mit einbezieht. Das Ergebnis unterscheidet sich aber je nach Wahl des variablen Sterns, der Vergleichssterne und der Apertur. Daher gilt es, mehrere Kombinationen auszuprobieren und die beste Kurve zu wählen. In unserem Experiment hat die bestmögliche Auswertung folgendes Ergebnis geliefert:

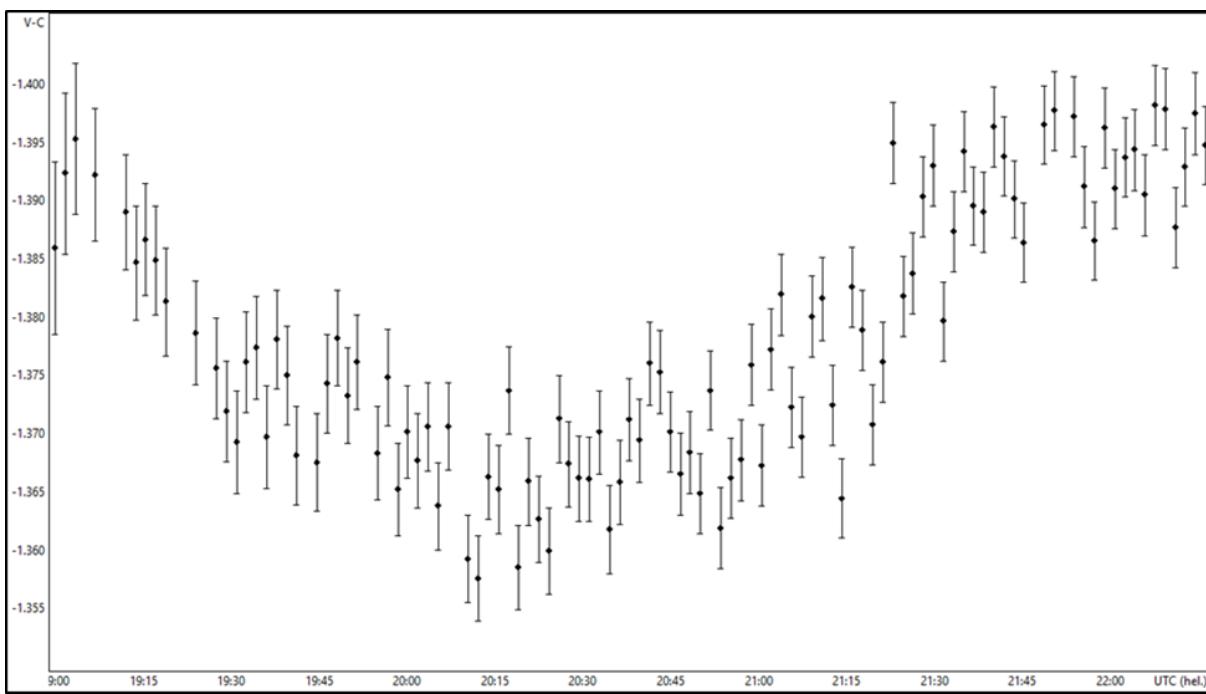


Abbildung 8 Helligkeitskurve von HAT-P 36 bei einem Transit seines Begleiters HAT-P 36b

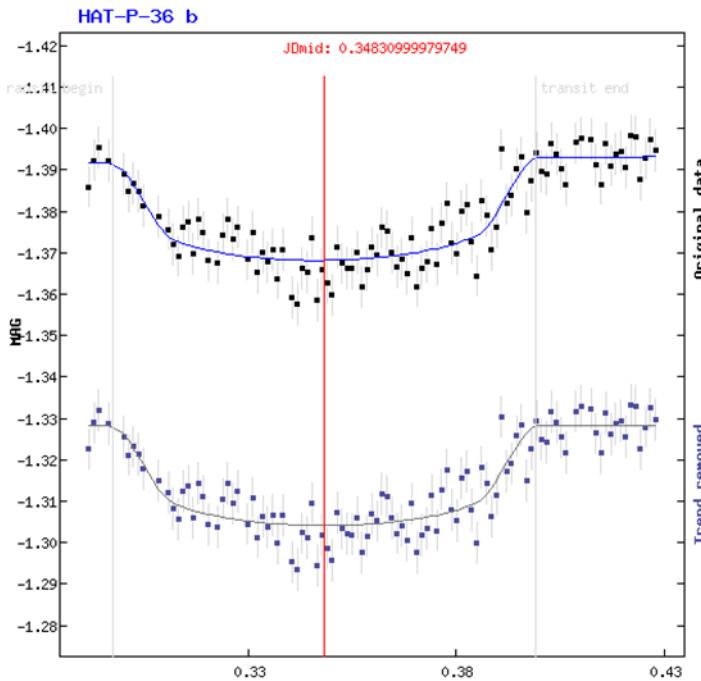


Abbildung 9 Ausgleichskurve und Trendanalyse

Ein Trend ^[52] wird dabei durch eine Änderung der äußeren Umstände hervorgerufen, beispielsweise wenn sich der Bezugswert verändert, und äußert sich in einer systematischen Zu- oder Abnahme der Messpunkte in Zeitreihen wie dieser. Bei dem Analyseschritt wird die durch den Trend gestörte Messreihe korrigiert, indem Anfang und Ende auf denselben Wert gebracht werden. Auch die Größe der jeweiligen Abweichung von der Ausgleichskurve wird graphisch dargestellt (→ Abb. 8).

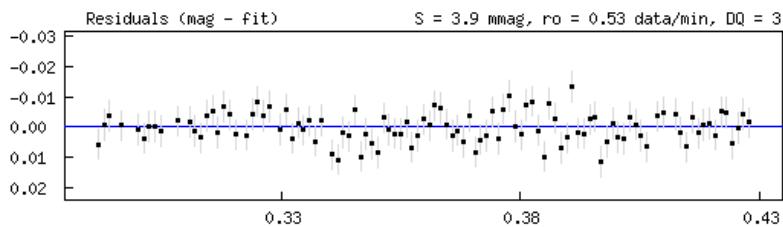


Abbildung 10 Abweichungen von der Ausgleichskurve

5. Berechnungen

Einige Parameter können aus der Messung selbst entnommen werden, andere lassen sich nachträglich aus den ermittelten Daten berechnen. Dazu gehören die Transittiefe, der Planetenradius, die Umlaufzeit, die große Bahnhalbachse, der Impact-Faktor und die Transiddauer.

Zusätzlich zu der Kurve konvertiert Muniwin die Daten in eine Text-Datei, welche auf der Exoplanet Transit Database hochgeladen werden kann, um im ersten Schritt eine Ausgleichskurve durch die Messpunkte zu legen (→ Abb. 7 oben) und im zweiten Schritt eine Trendanalyse durchzuführen ^[51] (→ Abb. 7 unten).

5.1. Transittiefe

Die Auswertung der Kurve über ETD liefert für die Transittiefe einen Wert von $\delta = 0,0241 (\pm 0,0015) \text{ mag}$. Sie ist definiert als „der relative Abfall der Helligkeit während eines Transits gegenüber der nicht reduzierten Helligkeit des Sterns“.^[53]

JD mid:	2458927.34426 +/- 0.00105
HJD mid:	2458927.34831 +/- 0.00105 (helcor = 0.00405)
Duration:	146.5 +/- 3.4 minutes
Depth:	0.0241 +/- 0.0015 mag

Abbildung 11 von der ETD berechnete Daten

5.2. Planetenradius

Die Tiefe eines Transits entspricht dem Verhältnis^[54] aus der Planetenscheibe und der Fläche der Sternenscheibe, die von ihr bedeckt wird. Es gilt also für die Transittiefe δ mit der allgemeinen Formel $A = \pi r^2$ für die beiden annähernd runden Scheiben:

$$\delta = \frac{A_P}{A_*} = \frac{\pi \cdot R_P^2}{\pi \cdot R_*^2} = \frac{R_P^2}{R_*^2} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Somit ergibt sich für den Planetenradius: $R_P = R_* \cdot \sqrt{\delta}$

Wie bereits angegeben (→4.2.1.) beträgt der Radius des Sterns HAT-P 36 das 1,096fache des Radius unserer Sonne^[55], also $R_{HATP36} = 1,096 \cdot R_\odot = 1,096 \cdot (696\,340 \text{ km}) = 763\,189 \text{ km}$

Mit diesen Werten errechnet sich der Radius von HAT-P 36b im Mittel zu:

$$R_{HATP36b} = R_{HATP36} \cdot \sqrt{\delta} = 763\,189 \text{ km} \cdot \sqrt{0,0241} \approx 118\,479 \text{ km}$$

Angegeben als Vielfaches des Jupiterradius^[56], mit $R_{\varnothing} = 69\,911 \text{ km}$

$$\frac{R_{HATP36b}}{R_{\varnothing}} = \frac{118\,479 \text{ km}}{69\,911 \text{ km}} = 1,695$$

$$R_{HATP36b} = 1,695 \cdot R_{\varnothing}$$

Die Unter- und Obergrenzen unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz sind

$$\text{Untergrenze: } R_{HATP36b} = 763\,189 \text{ km} \cdot \sqrt{0,0226} \approx 114\,732 \text{ km} = 1,641 R_{\varnothing}$$

$$\text{Obergrenze: } R_{HATP36b} = 763\,189 \text{ km} \cdot \sqrt{0,0256} \approx 122\,110 \text{ km} = 1,747 R_{\varnothing}$$

5.3. Umlaufzeit

Die Umlaufzeit ist ermittelbar durch eine wiederholte Beobachtung des Objektes. Beobachtet man mindestens zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Transits, deren Messdaten eine annähernd gleiche Kurve ergeben, kann man aus dem zeitlichen Abstand zwischen den Beobachtungen die Umlaufzeit ablesen. ^[57] Da aufgrund des Wetters und der Krisensituation wegen Covid-19 keine zweite Messung möglich gewesen ist, kann die Umlaufzeit lediglich von der Exoplanet Transit Database als $P = 1,327 \text{ d} = 114\,652,8 \text{ s}$ übernommen werden.

5.4. große Bahnhalbachse

Mithilfe des dritten Kepler'schen Gesetzes und der Gravitationskonstante G lässt sich die große Bahnhalbachse wie folgt bestimmten:

$$\frac{T_P^2}{a_P^3} = C \quad \text{mit} \quad C = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M_*}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_* \cdot T_P^2}{4 \cdot \pi^2}}$$

Angegeben wird die große Bahnhalbachse in astronomischen Einheiten (AE) ^[58], wobei eine astronomische Einheit der Distanz von der Sonne zur Erde entspricht, welche etwa 149 597 870 km beträgt.

Wie bereits angegeben (→ 4.2.1.) beträgt die Masse des Sterns HAT-P 36 das 1,022fache der Masse unserer Sonne ^[59], also

$$M_{HATP36} = 1,022 \cdot M_\odot = 1,022 \cdot (1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}) = 2,033 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Mit diesen Werten errechnet sich die große Bahnhalbachse von HAT-P 36b zu:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_{HATP36} \cdot T_{HATP36b}^2}{4 \cdot \pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot (2,033 \cdot 10^{30} \text{ kg}) \cdot (114\,652,8 \text{ s})^2}{4 \cdot \pi^2}}$$

$$a = 3\,561\,565\,379 \text{ m} = 0,0238 \text{ AE}$$

5.5. Impact-Faktor

Bereits während der Auswertung hat die ETD den sogenannten Impact-Faktor ^[60] ermittelt, welcher definiert ist als die Distanz zwischen dem Zentrum der Sternscheibe und dem Zentrum der Planetenscheibe während der Konjunktion, also der „scheinbaren Begegnung“ ^[61] dieser Himmelskörper. Für die Berechnung werden die Bahnneigung i des Exoplaneten, seine große Bahnhalbachse a und der Radius seines Sternes R_{Stern} bzw R_* herangezogen. Die Formel dazu errechnet sich aus der Skizze zu

$$b = \frac{a \cdot \cos(i)}{R_{Stern}}$$

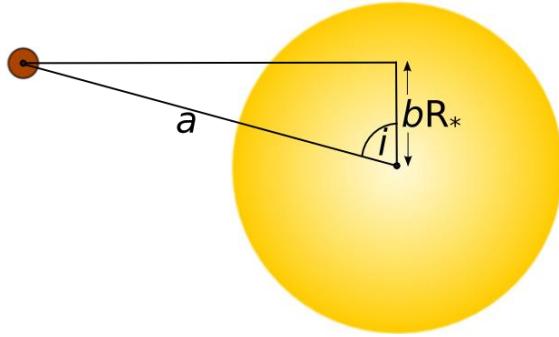


Abbildung 12 Skizze zur Berechnung des Impact-Faktors

Mit einer vorausgesetzten Inklination von $i = 86 \text{ deg}$ aus der ETD und je nach Rundung der Werte für die große Bahnhalbachse und den Sternradius kommt die Database auf einen Impact-Faktor von

impact factor :	$(\text{SemiMajorAxis} * \cos(\text{Inclination}) / R_{star}) :$
	0.312

Abbildung 13 von der ETD berechneter Wert des Impact-Faktors

Dieser steht in einem engen Zusammenhang mit der Länge des Transits, denn wie lange ein Planet für seinen Vorüberzug braucht hängt stark davon ab, welche Strecke er vor der Sternscheibe zurücklegen muss, die wiederum auf die Transithöhe ankommt. Der Impact-Faktor an sich ist ein Maß für diese, da er zwischen $b = 0$ im Zentrum der Sternscheibe und $b = 1$ an ihrem Rand liegt. Deshalb lässt sich durch ihn die wahrscheinliche Transithöhe des Exoplaneten vor seinem Stern erkennen.

5.6. Transitdauer

Mit dem Impact-Faktor, den Radien der Objekte und dem Satz des Pythagoras lässt sich zunächst die scheinbare Strecke berechnen, die die Planetenscheibe vor der Sternenscheibe zurücklegt.

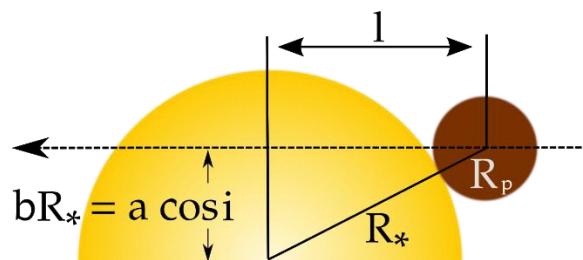


Abbildung 14 Skizze zur Berechnung der scheinbar beim Transit zurückgelegten Strecke

$$s = 2l = 2 \cdot \sqrt{(R_* + R_p)^2 - (bR_*)^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{(763\,189\,km + 118\,479\,km)^2 - (0,312 \cdot 763\,189\,km)^2} \\ \approx 1\,697\,810\,km$$

Daraus kann dann gemäß der untenstehenden Figur die Transitsdauer ermittelt werden, sofern von einem kreisförmigen Orbit ausgegangen wird. In solch einem Idealfall beträgt die Länge des gesamten Umlaufes $2\pi a$ weil die Halbachse a gleich dem Radius r der Kreisbahn gesetzt wird.

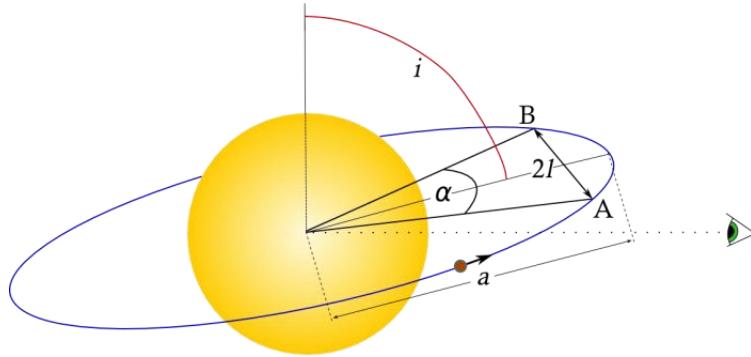


Abbildung 15 Skizze zur Berechnung der Transitsdauer

Aus dem zweigeteilten Dreieck, das zwischen dem Zentrum des Sterns sowie dem Eintrittspunkt A und dem Austrittspunkt B des Transits besteht, ergibt sich die Beziehung

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{l}{a} \Leftrightarrow \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{l}{a}\right) \cdot 2$$

Und damit für die gesamte Transitsdauer T als Bruchteil der Periodendauer P

$$T_{Transit} = P \cdot \frac{\alpha}{2\pi} = P \cdot \frac{\sin^{-1}\left(\frac{l}{a}\right) \cdot 2}{2\pi} = \frac{P}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{l}{a}\right) = \frac{P}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(R_* + R_P)^2 - (bR_*)^2}}{a}\right)$$

Damit kommt man wie die Exoplanet Transit Database (→ Abb. 9) auf einen Wert von etwa

$$T_{Transit} = \frac{P}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(R_{HATP36} + R_{HATP36b})^2 - (bR_{HATP36})^2}}{a}\right) \\ = \frac{114\,653\,s}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(763\,189\,km + 118\,479\,km)^2 - (0,312 \cdot 763\,189\,km)^2}}{3\,561\,565\,km}\right) \\ \approx 8783\,s \approx 146,4\,\text{min} \quad (\text{ETD je nach Rundung: } 146,5\,\text{min})$$

6. Vergleich

	Ergebnis der Datenbank	Ergebnis der Messung	absoluter Fehler	relativer Fehler
Transitdauer	132,9 min	146,5 min	13,6 min	10,23%
Transittiefe	0,0204 mag	0,0241 mag	0,0037 mag	18,14%
Planetenumfang	1,264 R_{\odot}	1,695 R_{\odot}	0,431 R_{\odot}	34,10%

Wie zu erkennen ist, sind bei der Berechnung der Parameter von HAT-P 36b große relative Fehler aufgetreten. Obwohl gerade in der Astronomie größere Abweichungen keine Seltenheit sind und ohne die Ausstattung professioneller Astronomen auch erwartet werden sollten, muss man sich an der Stelle fragen, woher sie stammen können und wie man sie reduzieren kann. Dazu geht man den Weg des Lichtes ab und überlegt Schritt für Schritt, wo Störungen auftreten könnten und ob sie ins Gewicht fallen.

An erster Stelle steht die Atmosphäre: Wolkenschleier am scheinbar freien Himmel werden allerdings durch die Trend-Analyse ausgeglichen.

An zweiter Stelle steht die CCD-Kamera: Detektorrauschen wird allerdings durch die Kühlung der Kamera bestmöglich minimiert.

An dritter Stelle steht das Bildmaterial: Vignettierung an den Bildrändern kommt allerdings bei Linsenteleskopen kaum vor.

Leichte Abweichung treten also natürlicherweise auf, aber große Abweichungen wie diese können nicht hinreichend erklärt werden. Daher komme ich zu dem Schluss, dass die Software die große Unbekannte bei dieser Messung war. Vermutlich wurde von ihr eine Spline-Interpolation durchgeführt, also die Ausgleichskurve Stück für Stück generiert. Dies ist nicht schlecht, kann aber manchmal weniger verlässlich sein als unser visuelles Empfinden. Zur Auswertung eignet sich also eventuell unser Menschenverstand besser als eine Maschine. Aus diesem Grund habe ich die Daten selbst noch einmal per Hand ausgewertet.

So erkennt man andere Zeitpunkte für den Anfang und das Ende des Transits und kommt somit auf eine Transitdauer von 135 Minuten. Genauso verhält es sich auch mit der Transittiefe, die nach Augenmaß auf 0,022 Magnituden geschätzt werden kann. Es ist zu vermuten, dass diese Abschätzungen um 5 Minuten beziehungsweise 0,002 Magnituden ungenau sind, doch mit diesen Intervallen liegt das Ergebnis dann schon eher in dem Fehlerbereich, der durch die erwähnten aber minimierten Effekte erklärt werden kann.

7. abschließende Betrachtung

Selbst wenn also der Radius des beobachteten Exoplaneten nicht hinreichend genau bestimmt werden konnte, was Folgefehler in den weiteren Berechnungen nach sich zieht, war es uns zumindest möglich, die Existenz von HAT-P 36b über die klare Einkerbung in der Helligkeitskurve zweifellos zu bestätigen und den Datenpool um HAT-P 36b zu erweitern, damit bestehende Werte in der Zukunft exakter bestimmt werden können. Denn über die ETD kann man sich nicht nur Beobachtungsvorschläge für eine Nacht anzeigen lassen, sondern auch eigenständig ermittelte Messdaten eingeben. Das zu tun ist von Relevanz für die Astronomie, denn die Bahnparameter eines Exoplaneten lassen sich umso genauer bestimmen, je mehr Messungen seines Transits vorliegen. ^[62]

Deshalb können auch Amateurastronomen mit ihrer Arbeit einen beachtlichen Beitrag zum großen Ganzen leisten. Doch auch über das Erstellen von Helligkeitskurven hinaus kann jeder eine Hilfe für die Wissenschaft sein. Sogenannte „Citizen Scientist“ werden beispielsweise darum gebeten, sich durch die Lichtkurvendaten des Kepler-Weltraumteleskops (www.planethunters.org) zu arbeiten und in ihnen nach den charakteristischen Einkerbungen zu suchen, die auf vorüberziehende Exoplaneten hinweisen. Wenn viele verschiedene „Citizen Scientists“ in einer Kurve, die noch keinem Exoplanetenkandidaten zugeordnet wurde, solch eine Einkerbung entdecken und melden, analysiert das an diesem Projekt mitarbeitende Wissenschaftlerteam die Daten genauer und lässt zur Verifizierung Beobachtungen mit Teleskopen folgen. ^[63]

Auf diese beiden Weisen kann also nicht nur ein professioneller Astronom, sondern Jedermann an der Suche nach Exoplaneten teilhaben, womit die Frage meiner Facharbeit beantwortet ist.

8. Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt und nur die von mir im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen herangezogen habe. Die Vorbereitung und Durchführung der Messung ist allerdings in Zusammenarbeit mit folgenden Personen erfolgt:

Dr. Rüdiger de Boer (Lehrer für Physik und Informatik am Bischöflichen Angela-Merici-Gymnasium Trier und mein Betreuer bei der Astronomie-AG des Vereins Sternwarte Trier e.V.) hat mir bei der Themenfindung geholfen und die nachfolgenden Kontakte hergestellt.

Markus Weber (Industriebuchbindermeister und Geschäftsführer der Buchbinderei Schwind GmbH sowie Gerätewart und Vorstandsmitglied des Vereins Sternwarte Trier e.V.) hat mir Tipps zum Auffinden von Exoplaneten gegeben, die Sternwarte in Trier-Irsch für die passenden Tage der Exoplanetendurchgänge bereitgestellt, mich in die Kamera- und Instrumententechnik eingewiesen (Steuerung des Teleskops, Umgang mit der Sternwartenkuppel), meine Messungen betreut und mir die Auswertungssoftware empfohlen.

Michael Kettler (Mitglied des Vereins Sternwarte Trier e.V.) war ebenfalls als Betreuung während Messungen anwesend und stand als Ansprechpartner bereit.

In dem Wissen, dass meine Forschung in dieser Form ohne ihre Unterstützung nicht möglich gewesen wäre, bedanke ich mich bei ihnen für ihre Bereitschaft und ihren Einsatz.

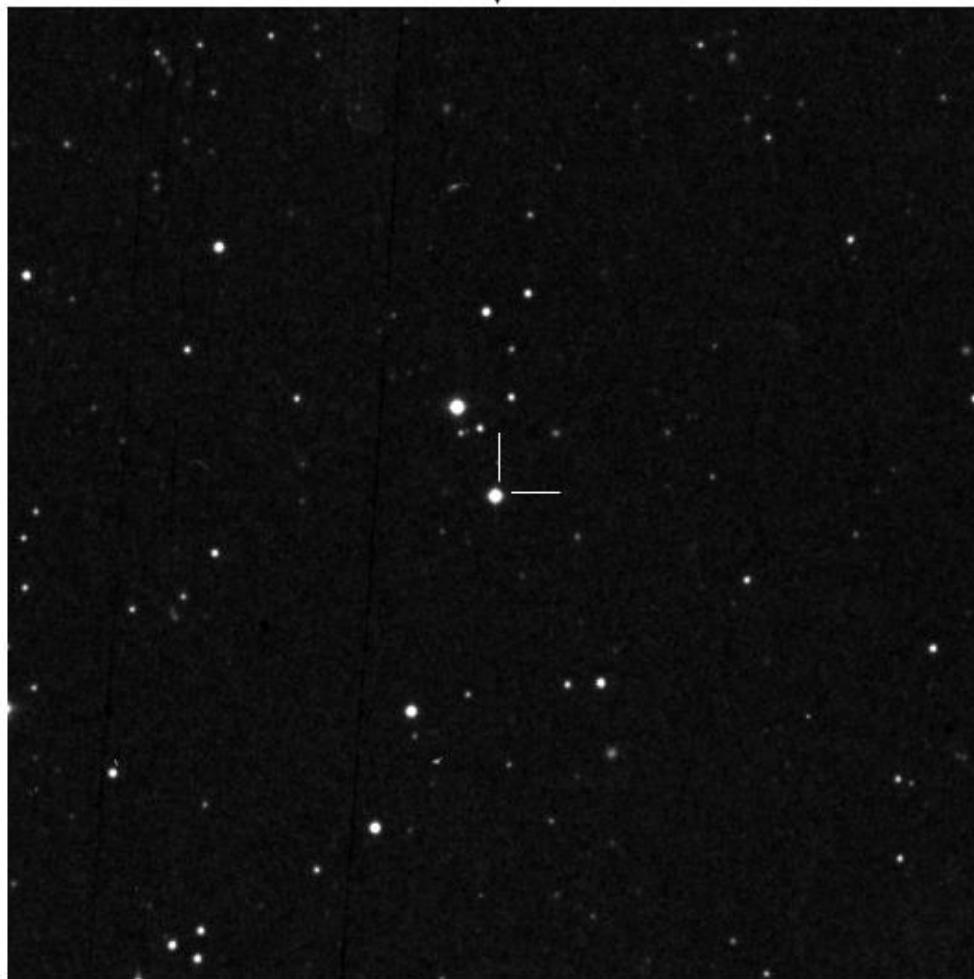
Anhang

9. weitere Bilder

Auswahl des Exoplaneten-Kandidaten über die ETD

HAT-P-36 b (CVn)

RA (J2000): 12 33 03.96, DE (J2000): +44 54 55.3,
V = 12.262 mag, dV = 0.0204 mag, duration = 132.9 minutes
Per = d, T0(HJD) =



15' x 15' image from the [Digitized Sky Survey](#) at the STScI Archive.

Your ELONGITUDE (in deg): 0° - 360°
Your LATITUDE (in deg): 90° - 0° - -90°

Transits predictions for NEXT 365 days ([show previous year](#))
ELONGITUDE: 6.6° and LATITUDE: 49.8°

Erstellen eines Master Dark Frame und eines Master Flat Fields

Abbildung A1a Erstellen eines neuen Projekts für Master Dark Frames

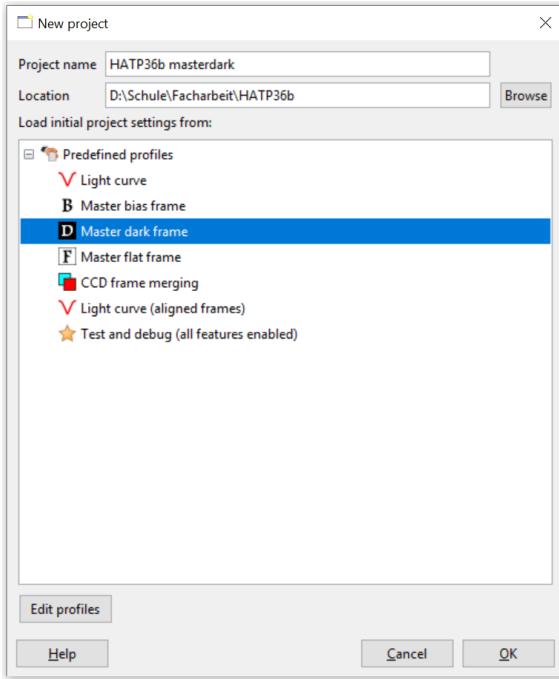


Abbildung A1b Erstellen eines neuen Projekts für Master Flat Fields mit Dark Frame Korrektur

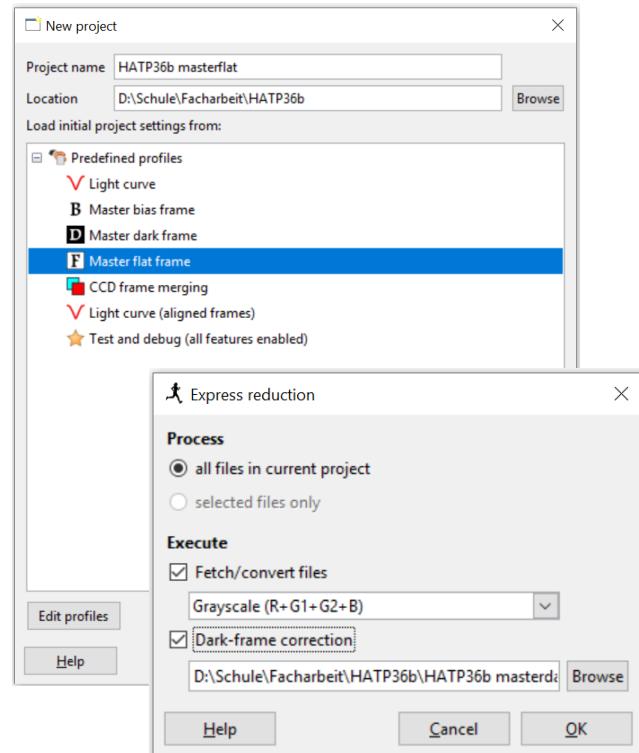


Abbildung A2 Hinzufügen von Aufnahmen zum Projekt für den Master Dark Frame und das Master Flat Field

Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
1	2020-03-21 14:22:16	90.000	N/A			Conversion OK
2	2020-03-21 14:23:59	90.000	N/A			Conversion OK
3	2020-03-21 14:25:42	90.000	N/A			Conversion OK
4	2020-03-21 14:27:26	90.000	N/A			Conversion OK
5	2020-03-21 14:29:09	90.000	N/A			Conversion OK
6	2020-03-21 14:30:52	90.000	N/A			Conversion OK
7	2020-03-21 14:32:35	90.000	N/A			Conversion OK
8	2020-03-21 14:34:18	90.000	N/A			Conversion OK
9	2020-03-21 14:36:01	90.000	N/A			Conversion OK
10	2020-03-21 14:37:44	90.000	N/A			Conversion OK

Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
1	2020-03-21 14:18:20	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
2	2020-03-21 14:18:34	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
3	2020-03-21 14:18:47	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
4	2020-03-21 14:19:01	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
5	2020-03-21 14:19:14	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
6	2020-03-21 14:19:28	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
7	2020-03-21 14:19:41	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
8	2020-03-21 14:19:55	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
9	2020-03-21 14:20:09	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK

Abbildung A3 Reduktionsprozesse für Master Dark Frame und Master Flat Field

Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
1	2020-03-21 14:23:01	90.000	N/A			Conversion OK
2	2020-03-21 14:24:44	90.000	N/A			Conversion OK
3	2020-03-21 14:26:27	90.000	N/A			Conversion OK
4	2020-03-21 14:28:11	90.000	N/A			Conversion OK
5	2020-03-21 14:29:54	90.000	N/A			Conversion OK
6	2020-03-21 14:31:37	90.000	N/A			Conversion OK
7	2020-03-21 14:33:20	90.000	N/A			Conversion OK
8	2020-03-21 14:35:03	90.000	N/A			Conversion OK
9	2020-03-21 14:36:46	90.000	N/A			Conversion OK
10	2020-03-21 14:38:29	90.000	N/A			Conversion OK

Frame #	Date and time (UTC)	Exposure	Filter	Stars found	Stars matched	Status
D 1	2020-03-21 14:18:20	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 2	2020-03-21 14:18:34	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 3	2020-03-21 14:18:47	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 4	2020-03-21 14:19:01	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 5	2020-03-21 14:19:15	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 6	2020-03-21 14:19:28	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 7	2020-03-21 14:19:42	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 8	2020-03-21 14:19:55	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK
D 9	2020-03-21 14:20:09	0.500	Luminance			Dark-frame correction OK

Abbildung A4a fertiger Master Dark Frame



Abbildung A4b fertiges Master Flat Field



Auswertung der ersten Probemessung des Exoplaneten WASP-77b

(Verweis von → 4.1.)

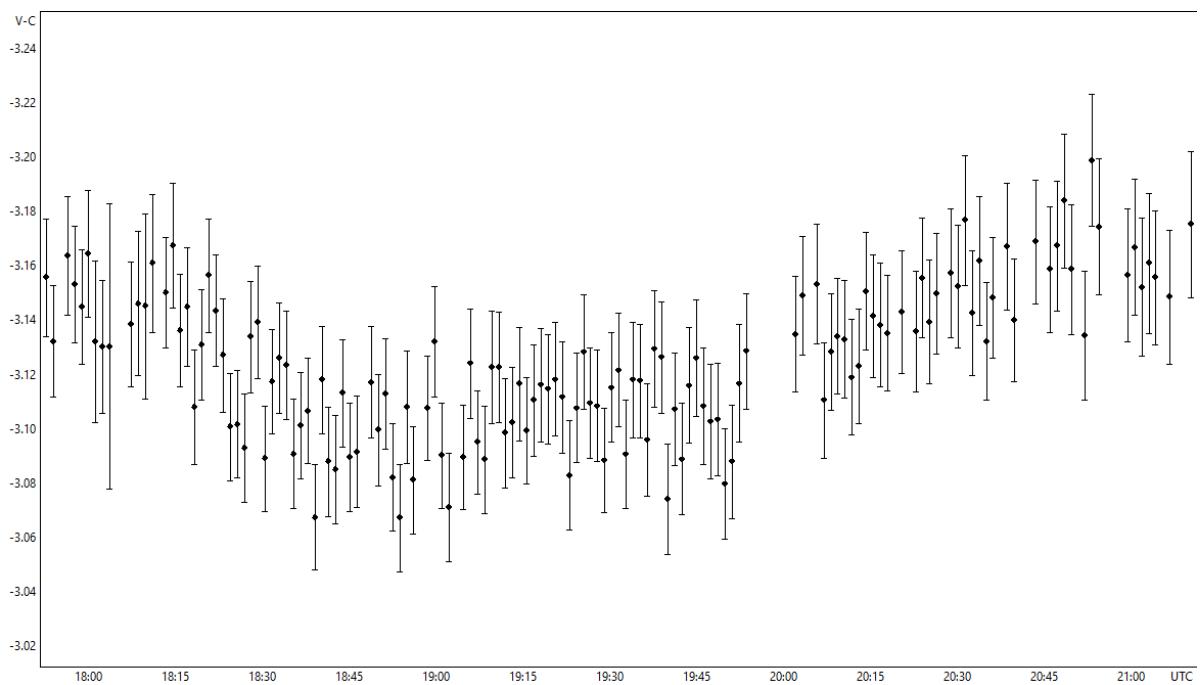


Abbildung A5 Helligkeitskurve WASP-77b

10. Verzeichnis

10.1. Literaturverzeichnis

Buchtitel

als Anleitung für Durchführung und Auswertung

Gary, Bruce L. (2014): Exoplanet Observing for Amateurs, Second Edition Plus, Hereford, USA

Motl, David (2019): C-Munipack 2.1 User's manual, Version 2.1.26

Textbelege

Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart

Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg

Verweise

[1] Definition Planet, Seite 1: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 54 sowie Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 21

[2] Definition Exoplanet, Seite 2: abgerufen 21.03.2020 von
<https://de.wikipedia.org/wiki/Exoplanet>

[3] erster Exoplanet, Seite 2: Lossau, Norbert (07.11.2017): Der erste Exoplanet wurde vor 100 Jahren entdeckt, abgerufen 31.03.2020 von
<https://www.welt.de/wissenschaft/article170399285/Der-erste-Exoplanet-wurde-vor-100-Jahren-entdeckt.html>

[4] Anzahl Exoplaneten, Seite 2: MDR (12.07.2019): 4.000 Exoplaneten im Schnelldurchlaufen, abgerufen 31.03.2020 von <https://www.mdr.de/wissen/entdeckung-exoplaneten-nasa-100.html>

[5] Überlegung, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 7

[6] Aufzählung der Anomalien, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 91

[7] Masse Heißer Jupiter, Seite 2: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 86

[8] Temperatur Heißer Jupiter, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9

[9] Distanz Heißer Jupiter, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 84

[10] Entstehung Heißer Jupiter, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 83

[11] Frostgrenze, Seite 2: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 83

[12] Migrationstheorie, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 83

[13] Gezeitenkräfte Heißer Jupiter, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 83

[14] Radialgeschwindigkeitsmethode, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 84

[15] Radialgeschwindigkeitssignatur, Seite 3: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 23

[16] Umlaufzeit Heißer Jupiter, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 85

[17] Helligkeitsänderung, Seite 3: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 40

[18] Erklärung, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 72

[19] Allgemeingültigkeit, Seite 3: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 40

[20] Kombination der Techniken, Seite 3: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 35

[21] Direktmethode, Seite 3: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9 und Seite 78

[22] Direktmethode, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 35

[23] Lichtlaufzeit, Seite 4: abgerufen 28.03.2020 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtlaufzeit>

[24] Masseschwerpunkt, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 68

[25] Lichtlaufzeit-Methode, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 76

[26] Relativitätstheorie, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 74 sowie Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 37

[27] Microlensing, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9

[28] Microlensing, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 74

[29] Microlensing, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9 mit einer Ergänzung von Seite 74

[30] Astrometrie, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9

[31] Astrometrie, Seite 4: Piper, Sven (2014): Exoplaneten: Die Suche nach einer zweiten Erde, 2. Auflage, Heidelberg, Seite 39

[32] Radialgeschwindigkeit, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 68

[33] Radialgeschwindigkeitsmethode, Seite 4: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9 und Seite 67

[34] Dopplereffekt, Seite 5: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 8

[35] Graphische Darstellung, Seite 5: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 69

[36] Transitmethode, Seite 5: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 9 und Seite 70

[37] Flattener, Seite 6: Gade, Thomas (2015): Teleskop als Teleobjektiv, abgerufen 20.03.2020 von <https://www.photoinfos.com/astronomie/Teleskop-als-Teleobjektiv/Teleskop-Korrektur-der-Bildfeldwoelbung-Flattener.htm>

- [38] SIPS, Seite 6: abgerufen 04.04.2020 von <https://www.gxccd.com/cat?id=146>, <http://www.tcmt.org/img/SIPSphotometry.pdf>
- [39] ETD, Seite 7: Poddany S., Brat L., Pejcha O., New Astronomy 15 (2010), pp. 297-301, Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits (arXiv:0909.2548v1)
- [40] Daten HAT-P 36, Seite 7: abgerufen 20.03.2020 von http://exoplanet.eu/catalog/HAT-P-36_b/, <http://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/HAT-P-36.html>
- [41] Sternbild Jagdhunde, Seite 7: abgerufen 20.03.2020 von [https://de.wikipedia.org/wiki/Jagdhunde_\(Sternbild\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Jagdhunde_(Sternbild))
- [42] Spektralklassen, Seite 7: Lehwald, Mario: Zustandsgrößen, abgerufen 20.03.2020 von http://www.andromedagalaxie.de/html/sterne_zustandsgroessen.htm
- [43] Daten HAT-P 36b, Seite 8: abgerufen 20.03.2020 von <http://www.openexoplanetcatalogue.com/planet/HAT-P-36%20b>
- [44] Bahtinov-Maske, Seite 8: abgerufen 20.03.2020 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahtinov-Maske>
- [45] Referenzstern, Seite 9: abgerufen 20.03.2020 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Anschlussstern>
- [46] Autoguider, Seite 10: abgerufen 20.03.2020 von <https://astrofotografie.hohmann-edv.de/aufnahmetechniken/autoguiding.php>
- [47] Bias, Seite 11: abgerufen 28.03.2020 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Vorspannung>
- [48], [49], [50] Bildsensorkalibrierung, Seite 11: abgerufen 28.03.2020 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Bildsensorkalibrierung>
- [51] Trendanalyse, Seite 13: FitProcedureDescription-Pejcha2008(1)
- [52] Trend, Seite 13: abgerufen 28.03.2020 von <https://www.statisticshowto.com/trend-analysis/>, [https://de.wikipedia.org/wiki/Trend_\(Statistik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Trend_(Statistik))

[53] Definition Transittiefe, Seite 14: abgerufen 04.04.2020 von
<https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>

[54] Berechnung Transittiefe, Seite 14: abgerufen 04.04.2020 von
<https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial.html>

[55] Werte Sonne, Seite 14: Grayzeck, Ed (23.02.2018): Sun Fact Sheet, abgerufen 04.04.2020 von <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

[56] Werte Jupiter, Seite 14: Grayzeck, Ed (18.11.2019): Jupiter Fact Sheet, abgerufen 04.04.2020 von <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jupiterfact.html>

[57] Umlaufzeit, Seite 15: abgerufen 04.04.2020 von
<https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>

[58] Astronomische Einheit, Seite 15: abgerufen 04.04.2020 von
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/astronomische-einheit/825>

[59] Werte Sonne, Seite 15: Grayzeck, Ed (23.02.2018): Sun Fact Sheet, abgerufen 04.04.2020 von <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

[60] Impact-Faktor, Seite 15: Wilson, Paul Anthony: The exoplanet transit method, abgerufen 04.04.2020 von <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>

[61] Konjunktion, Seite 15: abgerufen 04.04.2020 von
[https://de.wikipedia.org/wiki/Konjunktion_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Konjunktion_(Astronomie))

[62] Erweiterung des Datenpools, Seite 19: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 168

[63] Arbeit der Citizen Scientists, Seite 19: Mackowiak, Bernhard (2015): Die Erforschung der Exoplaneten: Auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems, Stuttgart, Seite 169

10.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Transitposition und Helligkeit, Seite 5: selbst erstellt

Abbildung 2: Takahashi-Refraktor, Seite 6: Markus Weber

Abbildung 3: Newton-Teleskop, Seite 6: Markus Weber

Abbildung 4: Größenvergleich unseres Sonnensystems mit HAT-P 36b, Seite 8: Open Exoplanet Catalogue, abgerufen 20.03.2020 von

<http://www.openexoplanetcatalogue.com/planet/HAT-P-36%20b/>

Abbildung 5: Blick durch die Bahtinov-Maske, Seite 9: Screenshot

Abbildung 6: Ausschnitt der Sternenkarte „Guide“, Seite 9: Screenshot aus Guide

Abbildung 7: Fotoaufnahme mit der CCD-Kamera, Seite 9: Screenshot

Abbildung 8: Helligkeitskurve von HAT-P 36 bei einem Transit seines Begleiters HAT-P 36b, Seite 12: Auswertungsergebnis aus Muniwin

Abbildung 9: Ausgleichskurve und Trendanalyse, Seite 13: Auswertungsergebnis von ETD, abgerufen 28.03.2020 von

http://var2.astro.cz/ETD/transit_FIT_plotter.php?id=1586771067&hvezda=HAT-P-36%20b&Cp=2458927.351391&JDmid=0.34830999979749&D=146.5&Depth=0.0241

Abbildung 10: Abweichungen von der Ausgleichskurve, Seite 13: Auswertungsergebnis von ETD, abgerufen 28.03.2020 von

http://var2.astro.cz/ETD/transit_FIT_plotter_residuals.php?id=1586771067&oid=1872&hvezda=HAT-P-36%20b&Cp=2458927.351391&JDmid=0.34830999979749&D=146.5&Depth=0.0241

Abbildung 11: von der ETD berechnete Daten, Seite 14: abgerufen 28.03.2020 von

<http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Abbildung 12: Skizze zur Berechnung des Impact-Faktors, Seite 16: Wilson, Paul Anthony: The exoplanet transit method, abgerufen 04.04.2020 von

<https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>

Abbildung 13: von der ETD berechneter Wert des Impact-Faktors, Seite 16: Screenshot von ETD <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Abbildung 14: Skizze zur Berechnung der scheinbar beim Transit zurückgelegten Strecke, Seite 16: Wilson, Paul Anthony: The exoplanet transit method, abgerufen 04.04.2020 von <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>

Abbildung 15: Skizze zur Berechnung der Transitdauer, Seite 17: Wilson, Paul Anthony: The exoplanet transit method, abgerufen 04.04.2020 von <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>

Abbildungen des Anhangs: Screenshots von der ETD und Muniwin