

Photometrische Messungen von Exoplanetentransits

Einfluss der Reduktionsmethode auf die Ergebnisse

Florian Ennemoser

01114897

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor of Science

An der Naturwissenschaftlichen Fakultät der

Karl-Franzens-Universität Graz

Betreuer: Dr. Thorsten Ratzka

Institut für Physik

Institutsbereich Geophysik, Astrophysik und Meteorologie

Abstract

In the past 25 years exoplanet discovery and characterization skyrocketed from a niche science sector of astronomy to a massive part of modern astronomy which is even popular among non-scientists, as seen with the discovery of TRAPPIST-1. Exoplanets can be observed with various observation techniques. Here the transiting technique was used to verify exoplanets around other stars. Observing at the Lustbühel observatory in Graz, five transits of so called “hot jupiters” were measured, three of them successful. After collecting the data of the transits, several reduction methods were applied and compared, utilizing a modular a python script.

Zusammenfassung

In den letzten 25 Jahren entwickelte sich die wissenschaftliche Untersuchung von Exoplaneten von einem Nischensektor der Astronomie zu einem, auch unter der gesamten Bevölkerung, beliebten Teilgebiet der modernen Astronomie, erkenntlich am Beispiel der Entdeckung von TRAPPIST-1. Exoplaneten können mit verschiedensten Beobachtungstechniken nachgewiesen werden. In dieser Arbeit wurden mit der Transit-Methode fünf Sterne mit bekannten Exoplaneten vom Observatorium Lustbühel aus beobachtet. Drei Transits dieser sogenannten „Hot Jupiters“ konnten erfolgreich beobachtet werden. Im Anschluss wurden mit einem Python Script verschiedene Reduktionsmethoden auf die Daten angewendet und verglichen.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Exoplaneten: Definition und Geschichte	1
2	Methoden der Detektion	2
2.1	(Pulsar) Timing	3
2.2	Radialgeschwindigkeit / RV	3
2.3	Astrometrie	3
2.4	Direct Imaging	4
2.5	Transit	5
2.5.1	Dauer eines Transits	9
3	Photometrie und Bildreduktion	11
3.1	Apertur und Annulus	11
3.2	Bildreduktion	12
3.2.1	Darks	13
3.2.2	Bias	13
3.2.3	Master Dark	14
4	Beobachtungen am Observatorium Lustbühel	15
4.1	Teleskop und zusätzliches technisches Equipment	15
4.2	Allgemeiner Beobachtungsprozess	16
5	Datenauswertung	18
5.1	Python Programm	18
5.1.1	Python Bibliotheken	18
5.1.2	Python Programmcode	18
5.1.3	Differentielle Photometrie	22
6	Analyse der Reduktionsverfahren	23
6.1	WASP-52 (b)	23
6.1.1	Keine Reduktion	24
6.1.2	Standardreduktion	26
6.1.3	Master-Bias Reduktion	28
6.1.4	Bias und Median	29

6.1.5	Standardreduktion mit geringerer Anzahl an Dark-Frames im Dark-Master ..	30
6.1.6	Berechnete Planetendaten der verschiedenen Reduktionsmethoden	30
6.1.7	Einfluss von Apertur- und Annulus-Radius auf Flusswerte	33
6.2	HAT-P 19 (b)	34
6.2.1	Reduktionsmethoden	35
6.2.2	Berechnete Planetendaten von HAT-P 19 b	36
6.3	TrES-5 (b).....	37
6.3.1	Berechnete Planetendaten	39
7	Nicht erfolgreiche Beobachtungen	39
7.1	KELT-16 (b)	39
7.2	TrES-2 (b).....	41
8	Zusammenfassung und Aussichten.....	43
9	Literaturverzeichnis	45
10	Tabellenverzeichnis.....	46
11	Abbildungsverzeichnis	47
12	Appendix	50

1 Exoplaneten: Definition und Geschichte

Der Begriff Exoplanet, zusammengesetzt aus den griechischen Wörtern „*exo*“ für „*außen*“ und „*Planet*“ für „*Wanderer*“, bezeichnet einen Körper, welcher einen Orbit um einen anderen Stern besitzt. Diese Erkenntnis, dass es Planeten um andere Sterne gibt, ist noch relativ jung. Die Idee dahinter gibt es jedoch seit etwa 2000 Jahren. Epikur erklärte um 300 v.Chr.:

„Es gibt unendlich viele Welten, welche unserer einerseits ähneln, als auch andererseits ungleich sind.“¹

Mitte des 19. Jahrhunderts wurden die ersten wissenschaftlichen Publikationen zum Thema Exoplaneten veröffentlicht.² Diese stellten sich jedoch als inkorrekt heraus.

Die erste aufsehenerregende Entdeckung wurde 1995 gemacht. Es wurde ein $0.5 M_{\text{Jup}}$ Planet um den Hauptreihenstern 51 Peg entdeckt. Dies gelang mit Hilfe der Radial-Geschwindigkeitsmessung, auf die später noch eingegangen wird.

Erstaunlich an der Entdeckung von 51 Peg b war, dass dieser Planet eine Periode (Umlaufzeit um den Stern) von nur 4.2 Tagen besitzt. Jupiter, der sonnennächste Gasplanet in unserem Sonnensystem, hat eine Umlaufzeit von 12 Jahren. Aufgrund der Nähe zum Zentralgestirn wird der Planet sehr heiß, daher werden solche Planeten auch „Hot Jupiters“ genannt.

Nach nun mehr als 20 Jahren konnte eine Vielzahl an Planeten um andere Sterne entdeckt werden. Neben den oben erwähnten „Hot Jupiters“, welche auch im Zuge meiner Arbeit beobachtet wurden, wurden auch „Super-Earths“, erdähnliche Planeten, die teilweise ein Vielfaches der Erdmasse an Masse besitzen, entdeckt. Ebenfalls wurden terrestrische Exoplaneten beobachtet, welche sich in der habitablen Zone eines Sternes befinden und eine erdähnliche Masse besitzen.

¹ Vgl. Seager, 2010, S. 3

² Vgl. Jacob W. S. 1855 On certain anomalies presented by the binary star 70 Ophiuchi.

Bis Ende des Jahres 2017 wurden 3919 Exoplaneten bestätigt.³

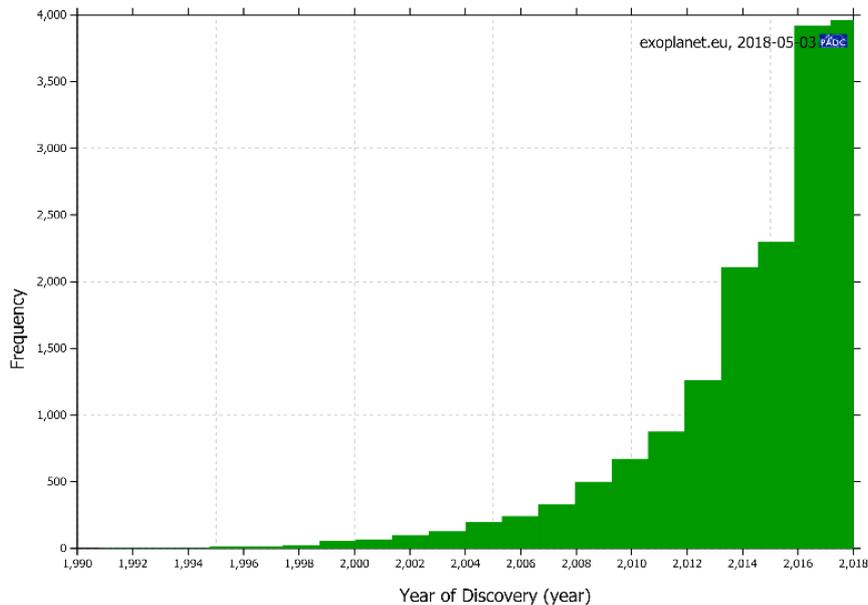


Abbildung 1: Kumulierte Histogramm-Darstellung der bestätigten Exoplaneten. Im Jahr 2018 wird es über 4000 bestätigte Exoplaneten geben.

Eigens zur Entdeckung von Exoplaneten konzipierte Satellitenmissionen weisen, wie zum Beispiel die Kepler-Mission seit 2009, Exoplaneten nach. Weitere Satellitenmissionen wie TESS, PLATO und CHEOPS werden die Zahl der Exoplaneten steigen lassen. Aber nicht nur Weltraumteleskope können Exoplaneten bestätigen.

Mit der Transit-Methode, welche in Kapitel 2.5 „Transit“ erläutert wird, haben kleine Arrays von Teleskopen auf der Erde eine große Anzahl von Exoplaneten nachweisen können. Die Kameras sind teilweise sogar nur mit Fotoobjektiven ausgestattet, wie zum Beispiel das SuperWASP in Südafrika.⁴

2 Methoden der Detektion

Exoplaneten können mit verschiedenen Varianten entdeckt werden. Diese sind grundsätzlich indirekt oder direkt. Indirekt bedeutet, dass das Zentralgestirn des Exoplaneten beobachtet wird. Durch charakteristische Änderungen der Messwerte kann darauf geschlossen werden, dass ein Exoplanet diese verursacht. Bei einer direkten Beobachtung hingegen kann der Planet

³ Vgl. <http://exoplanet.eu>

⁴ Vgl. <http://www.ing.iac.es/PR/newsletter/news8/ins3.html>

aktiv gemessen werden. Die folgenden Methoden wurden bis jetzt erfolgreich zur Entdeckung von Exoplaneten eingesetzt.

2.1 (Pulsar) Timing

Mithilfe von der normalerweise sehr konstanten Rotationsperiode von rotierenden Neutronensternen (Pulsare) können Radioteleskopen leichte Variationen der Rotationszeit der Pulsar-Signale messen. Diese entstehen dadurch, dass der Exoplanet und der Pulsar sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt drehen. Da jedoch der Exoplanet damit nur indirekt gemessen wird, können nur Parameter abgeleitet werden, die der Planet durch seine Anwesenheit am Stern verursacht. Dazu zählen Masse des Planeten und Orbitparameter. Eine Zusammensetzung der Atmosphäre des Exoplaneten kann damit nicht gemessen werden.⁵

2.2 Radialgeschwindigkeit / RV

Die Messung der Radialgeschwindigkeit (Englisch: „Radial Velocity“, kurz RV) wurde bereits 1888 von Hermann Carl Vogel angewendet. In seiner Arbeit bestätigt er, dass der Doppler-Effekt auch bei Sternen messbar ist, wenn diese sich auf uns zu oder von uns weg bewegen. Wie auch schon beim Pulsar-Timing, verursacht der Planet durch seine Masse eine Bewegung des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt zwischen ihm und dem Stern. Der um das Vielfache hellere Stern wird dabei mit einem Spektrographen gemessen. Die Verschiebung der Spektrallinien ins Rote oder Blaue gibt dann Aufschluss wie schnell sich der Stern von uns entfernt oder sich uns annähert. Je näher am Stern und je massereicher ein Planet ist, desto stärker ist die Verschiebung der Spektrallinien. 51 Pegasi b verursachte eine Radialgeschwindigkeitsänderung von lediglich 13 m/s.⁶

2.3 Astrometrie

Die genaue Messung der Sternposition am Himmel wird Astrometrie genannt.⁷ Die Astrometrie beruht auf dem gleichen Prinzip wie die RV Messungen. Ein System aus Stern und Planet dreht sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Der Vorteil gegenüber der RV Methode ist, dass die Inklination des Planetenorbits bekannt ist. Daher können Planetenmassen mit der RV Methode nur mit einem unteren Limit angegeben werden. Die Astrometrie hingegen misst 2 Komponenten der Sternbewegung. Dadurch lässt sich auch die

⁵ Vgl. Seager, 2010, S. 7

⁶ Vgl. Seager, 2010, S. 28 / <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7749>

⁷ Vgl. Haswell, 2010, S. 26

Inklination der Planetenbahn bestimmen, wodurch sich dann auch die Genauigkeit der abgeleiteten Planeteneigenschaften erhöht.⁸

2.4 Direct Imaging

Wie der Name es schon impliziert, wird bei der Direct Imaging Methode der Exoplanet direkt beobachtet. Um einen Exoplaneten direkt beobachten zu können, muss das Licht des Sterns über einen Coronagraphen abgedunkelt werden, weil der Stern ein um viele Magnituden helleres Objekt als der Exoplanet ist. Am Beispiel von Fomalhaut b erkennt man dieses Faktum (s. Abbildung 2): Der Planet ist 23 mag dunkler als der Stern. Um Orbitparameter ableiten zu können, müssen mehrere Aufnahmen (meistens im Abstand mehrerer Jahre) gemacht werden.⁹

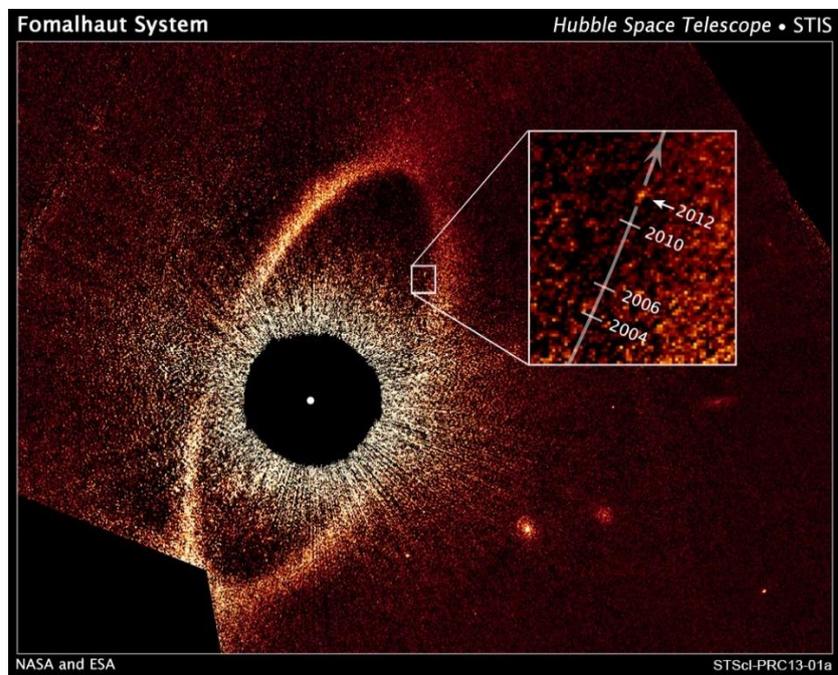


Abbildung 2: Fomalhaut-System mit dem Inset des Planeten Fomalhaut b. Der schwarze Bereich in der Mitte ist der durch den Coronagraph abgedeckte Bereich. Das Bild ist eine Montage aus B, V und I Band-Aufnahmen des Hubble Space Telescopes.¹⁰

⁸ Vgl. Seager, 2010, S. 158

⁹ Vgl. Seager, 2010, S. 111

¹⁰ Vgl. <https://www.spacetelescope.org>, 2018

2.5 Transit

Ein Transit im astronomischen Sinne passiert, wenn sich ein Objekt vor einem anderen vorbeibewegt. Bei einem Stern-Planeten-System wird durch den vorbeiziehenden Planeten das Licht des Sterns abgedunkelt.

Da Planeten sich idealerweise periodisch um einen Stern bewegen, entsteht dadurch eine periodische Änderung in der Lichtkurve des Sterns. Die Stärke des Einbruchs, auch „Dip“ oder „Depth“ genannt, in der Lichtkurve kann als Funktion abhängig vom Radius des Planeten interpretiert werden. Der Zusammenhang ist gegeben durch:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2} \quad (1)$$

Die Änderung des Flusses (gemessene Photonenmenge des Sterns pro Zeiteinheit) ΔF während des Transits relativ zum normalen Fluss F ist gleich dem Verhältnis der Radien von Planet und Stern zum Quadrat. Diese Formel gilt jedoch nur wenn die Lichtstrahlen von Planet und Stern annähernd parallel beim Beobachter ankommen, da die Geometrie bei kürzeren Abständen zu beachten ist (z.B. Venustransit).¹¹

Im folgenden Diagramm ist der verursachte Dip eines Planeten im Vergleich zu unterschiedlichen Spektralklassen aufgetragen. Der Planetenradius wird von Merkur (ca. 3000 km) bis Jupiter (ca. 70000 km) verändert. Evident ist, dass es bei der Spektralklasse M (Rote Zwerge) wesentlich leichter ist terrestrische Planeten per Transit zu entdecken, als bei G-Sternen wie unserer Sonne.

¹¹ Vgl. Haswell, 2010, S. 39

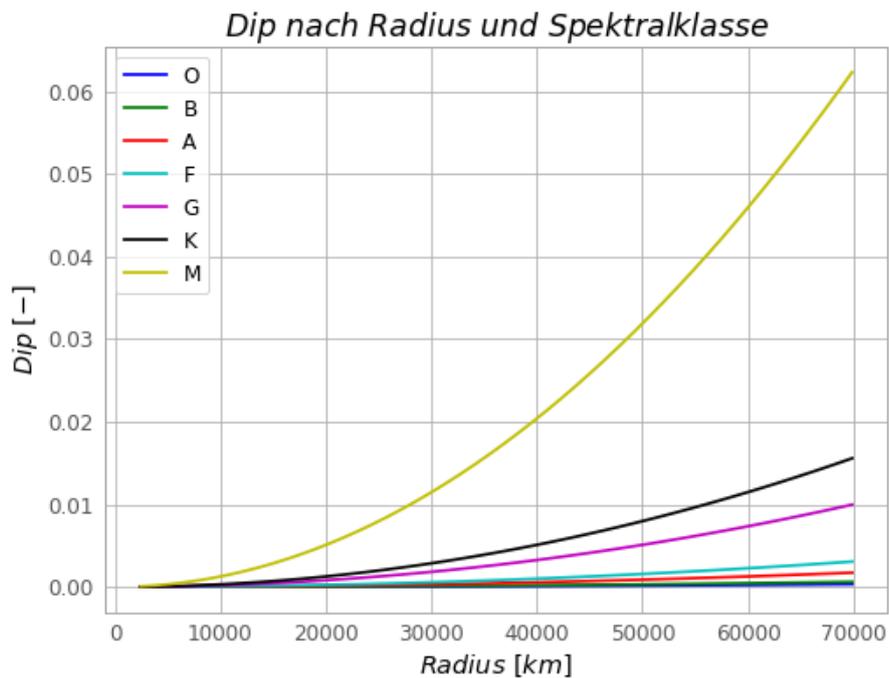


Abbildung 3: Je größer der Planetenradius, desto größer fällt der Dip in der Lichtkurve aus. Besonders bei Sternen mit geringem Radius können bei Planeten in Jupitergröße mehr als 5 % Lichtverlust beobachtet werden.

Hier wird auch der Nachteil der Transitmethode ersichtlich. Es kann lediglich festgestellt werden, ob sich ein Objekt vor den Stern bewegt, welches einen gewissen Radius hat. Das kann eine dichte Gaswolke, ein großes Ringsystem um einen kleinen Planeten oder ein jupitergroßer Exoplanet sein. Nur durch zusätzliche RV Messungen kann bestätigt werden, wie schwer dieses Objekt ist.

Ein weiterer Nachteil der Transitmethode ist, dass nur Planeten beobachtet werden können, die direkt vor dem Stern vorbeiziehen. Wenn der Planet am nächsten zum Beobachter steht, wird diese Phase des Orbits als $\phi = 0.0$ bezeichnet.¹²

Der Abstand zwischen den beiden projizierten Scheiben ist

$$d(\phi = 0.0) = a \cos(i) \tag{2}$$

mit dem Radius der Planetenbahn a und der Inklination i .

¹² Vgl. Haswell, 2010, S. 40f

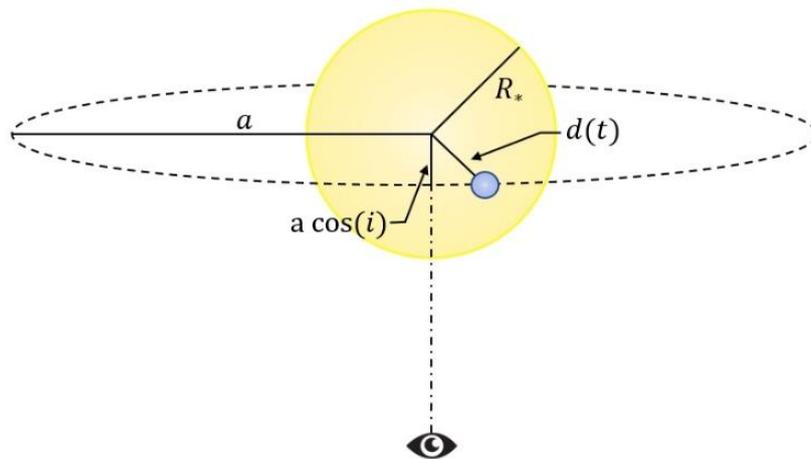


Abbildung 4: Geometrische Veranschaulichung, wie die Inklination der Planetenbahn die Sichtbarkeit eines Transits beeinflusst. Wenn die Inklination relativ zum Beobachter zu klein ist, ist kein Transit beobachtbar. Grafik angelehnt an Haswell, 2010, S. 41.

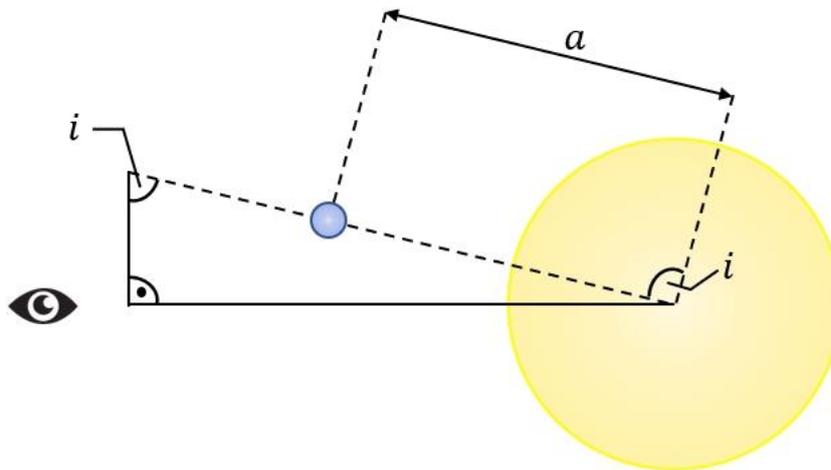


Abbildung 5: „Seitenansicht“ des Transits. Um die Berechnungen so einfach wie möglich zu halten, wird die Bahn als kreisförmig angenommen. Grafik angelehnt an Haswell, 2010, S. 41.

Der Beobachter kann den Exoplaneten nur wahrnehmen, wenn

$$a \cos(i) \leq R_* + R_p \quad (3)$$

ist.¹³ Wenn

$$R_* - R_p < a \cos(i) < R_* + R_p \quad (4)$$

dann handelt es sich um einen streifenden Transit. Die abdunkelnde Scheibe des Exoplaneten deckt nur teilweise die Sternscheibe ab. Es wurden bereits einige Exoplaneten mit solchen Bahnen gefunden.¹⁴

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Transit beobachtbar ist, beträgt in den meisten Fällen weniger als 1 %, wie in Abbildung 6 erkennbar ist. Demnach nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass ein Transit beobachtet werden kann, je größer der Stern und je kleiner der Bahnradius ist.¹⁵ Ab einer gewissen Entfernung zum Zentralgestirn wird die Wahrscheinlichkeit einer Transitbeobachtung für alle Hauptreihensterne verschwindend klein.

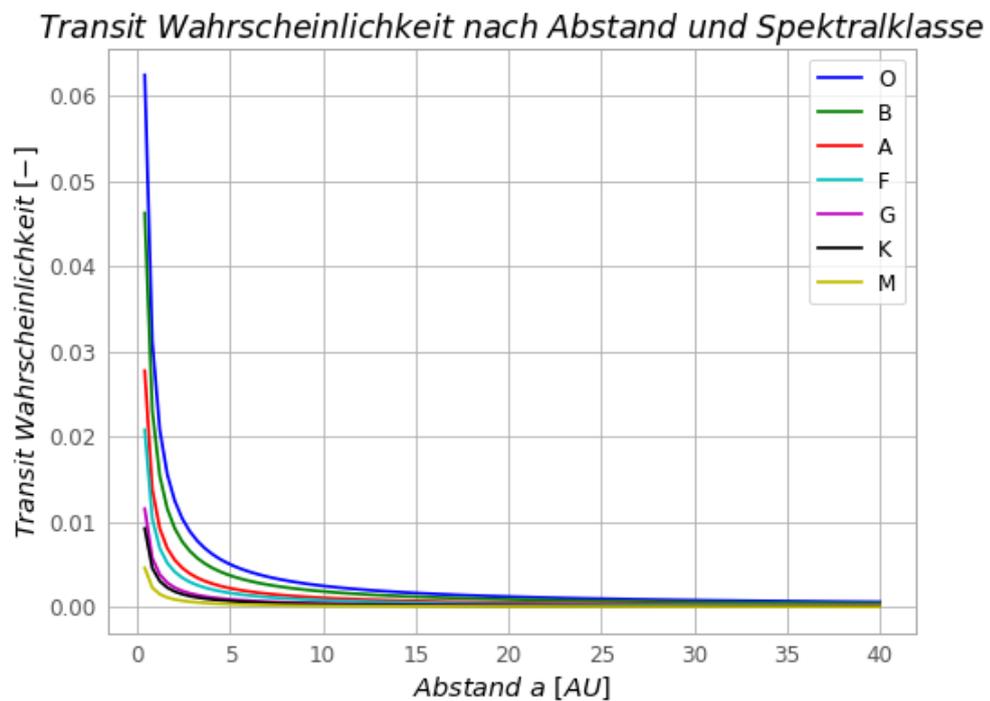


Abbildung 6: Exponentieller Abfall der Wahrscheinlichkeit eines Transits. Ab ca. 2.5 AU ist die Wahrscheinlichkeit bei jeder Hauptreihen-Spektralklasse unter 1%. Transits von Planeten, die sich in einer Umlaufbahn von mehr als 10 AU befinden, sind sehr unwahrscheinlich.

¹³ Vgl. Haswell, 2010, S. 42

¹⁴ Vgl. Lillo-Box, 2015

¹⁵ Vgl. Haswell, 2010, S. 42f

2.5.1 Dauer eines Transits

Ein Transit wird in 4 Momente eingeteilt: t_1 ist der Zeitpunkt an dem der Planet zuerst die Sternscheibe scheinbar berührt. t_2 tritt dann ein, wenn die Planetenscheibe vollständig vor der Sternscheibe steht. t_3 und t_4 sind die gleichen Ereignisse, nur beim Verlassen der Sternscheibe.

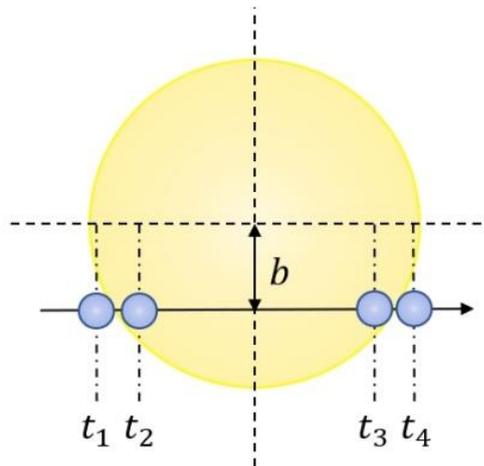


Abbildung 7: Zeitpunkte eines Transits. b ist der Stoßparameter.

Die gesamte Transitdauer kann mit

$$t_{ges} = t_4 - t_1 \quad (5)$$

berechnet werden.

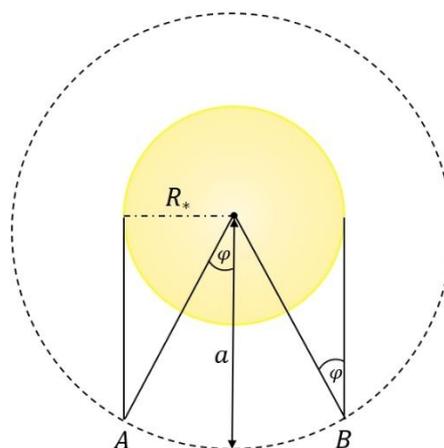


Abbildung 8: An Punkt A und B schneiden sich die Lichtstrahlen mit dem Orbit. Grafik angelehnt an Haswell, 2010.

Die Bogenlänge zwischen A und B, bei einer kreisförmigen Bahn, ist $2a\varphi$ mit dem Winkel

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{R_*}{a}\right) \quad (6)$$

Multipliziert man die Periode P mit dem Verhältnis der Bogenlänge zum gesamten Orbit erhält man die Transitdauer:

$$t_{ges} = P * \frac{2a \sin^{-1}\left(\frac{R_*}{a}\right)}{2\pi a} \quad (7)$$

Gekürzt ergibt es dann:

$$t_{ges} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{R_*}{a}\right) \quad (8)$$

Das gilt aber nur mit der Einschränkung, dass es sich um eine kreisförmige Bahn handelt, und wenn der „Stoßparameter“ $b = a \cos(i) = 0$, bzw. die Inklination $i = 90^\circ$ ist.¹⁶

Soll der Stoßparameter berücksichtigt werden, muss die von dem Stoßparameter abhängige halbe Bahnlänge (von t_1 nach t_4 aus Abbildung 7) anders berechnet werden:

$$k = \sqrt{(R_* + R_p)^2 - (a \cos i)^2} \quad (9)$$

$$t_{ges} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{k}{a}\right) \quad (10)$$

Wird ebenfalls angenommen, dass $R_p \ll R_* \ll a$, reduziert sich die Formel

$$\begin{aligned} t_{ges} &= \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - (a \cos i)^2}}{a}\right) \\ &= \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left[\sqrt{\left(\frac{R_*^2}{a^2} + \frac{2R_*R_p}{a^2} + \frac{R_p^2}{a^2} - \cos^2 i\right)}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

zu

$$t_{ges} \approx \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\sqrt{\left(\frac{R_*^2}{a^2} - \cos^2 i\right)}\right) \quad (12)$$

¹⁶ Vgl. Seager, 2010, S. 17f, 57f

Mit der Annahme, $\sin x \approx x$, wenn x sehr klein ist, folgt:¹⁷

$$t_{ges} \approx \frac{P}{\pi} \sqrt{\frac{R_*^2}{a^2} - \cos^2 i} \quad (13)$$

Mit differentieller Photometrie und der daraus resultierenden Lichtkurve wird t_{ges} und die Periode P gemessen. Durch die Spektralklasse des Sterns kann der Radius des Sterns abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich dann eine erste Abschätzung der Inklination der Bahn des Exoplaneten um den Stern.¹⁸

3 Photometrie und Bildreduktion

Mit Photometrie wird die Helligkeit, beziehungsweise die Änderung dieser gemessen. Die Helligkeit des Sterns wird gegen die Zeit oder Phase geplottet.¹⁹ Da das in dieser Arbeit erstellte und verwendete Python-Programm (s. Kapitel 5.1 *Python Programm*) in Englisch geschrieben ist, werden englische Fachbegriffe verwendet.

Wichtig, um zu verstehen wie der Programmcode aus dem Kapitel „Python Programm“ funktioniert, sind einige Begriffe, die nun hier eingeführt werden:

3.1 Apertur und Annulus

Die Apertur und der Annulus werden zentral um den Stern gelegt. Die Apertur wird für die Messung des Photonen-Flusses verwendet, indem alle Pixelwerte innerhalb der Apertur addiert werden. Dabei handelt es sich dann um das gesamte Signal des Sterns. Um den tatsächlichen Fluss des Sterns zu berechnen, muss allerdings noch der Sky Background, also der Median der Pixelwerte des Annulus abgezogen werden.²⁰

Die Pixel, welche sich zwischen Apertur und Annulus befinden, werden nicht berücksichtigt. Die Größe von Apertur und Annulus hängen von Sternhelligkeit und atmosphärischen Bedingungen ab.

¹⁷ Vgl. Haswell, 2010, S. 94

¹⁸ Vgl. Haswell, 2010, S. 95

¹⁹ Vgl. Warner, 2006, S. 3

²⁰ Vgl. Warner, 2006, S. 41

Etwa 90% des Lichtsignals eines Sterns befinden sich innerhalb eines Radius von $3 * FWHM$ (Full Width Half Maximum) um das Sternzentrum. Daher ist in der Praxis eine Apertur mit diesem Wert zu empfehlen.²¹

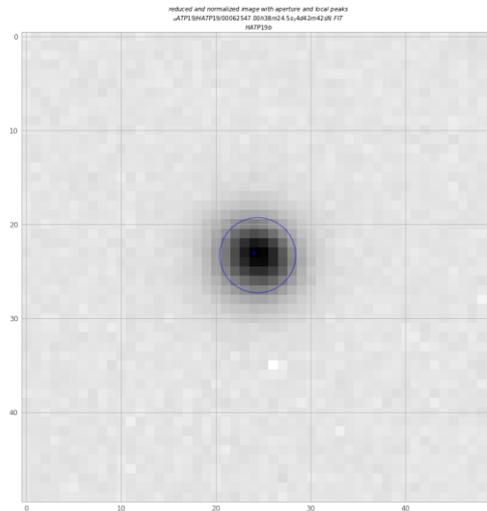


Abbildung 9: Reduziertes Bild von HAT-P 19. Der Messbereich, Apertur, ist als blauer Kreis dargestellt.

3.2 Bildreduktion

Da nicht reduzierte CCD-Bilder ungewollte Beiträge beinhalten, werden Reduktionsmethoden angewendet. Ein Bild, das mit einer CCD-Kamera aufgenommen wurde, kann vereinfacht mit „Dark“- „Bias“- und „Flat“-Frames reduziert werden. Ergänzend zu den Beobachtungsbildern („Lights“) werden diese Kalibrationsframes regelmäßig aufgenommen.



Abbildung 10: Einfacher Reduktionsprozess ohne Flatfield. Das Light (oder auch Science Frame genannt) wird reduziert, indem der Dark-Frame, bestehend aus Dark + Bias vom originalen Bild abgezogen wird.

²¹ Vgl. Warner, 2006, S. 43

3.2.1 Darks

„Darks“ werden mit der gleichen Belichtungszeit (und idealerweise gleichen CCD-Temperatur) wie Lights aber mit geschlossenem Shutter aufgenommen. Elektronen werden durch Gitterschwingungen ausgelöst. Je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen werden ausgelöst. Diese können nicht von Elektronen unterschieden werden, die durch Photonen ausgelöst werden. Das verursacht ein zusätzliches Signal im Light. Durch Subtraktion eines Darks wird das S/N- Verhältnis erhöht (Signal to Noise), indem der durch die Temperatur verursachte falsche Beitrag entfernt wird.

$$Light_{Red} = Light_{t_1} - Dark_{t_1} \quad (14)$$

Ein Dark-Frame enthält ein zusätzliches Rauschen – dieses wird an das reduzierte Light weitergegeben. Ein kombiniertes „Master-Dark“ Bild wird verwendet, um das zusätzliche Rauschsignal zu minimieren. Es sollten genügend Darks im Master-Dark kombiniert werden. 10 Darks bieten ein ausreichend gutes Master-Dark.²²

3.2.2 Bias

Bias-Frames sind Aufnahmen mit 0 Sekunden Belichtung und ebenfalls abgedunkelter Optik. Bias-Frames bestimmen den Nullpunkt der Potentialtöpfe und das Ausleserauschen und können bei kürzeren Belichtungszeiten anstatt des Darks zur Bildreduktion verwendet werden. Wenn sich die Belichtungszeiten von Dark und Light Frame unterscheiden, kann man mit den Bias-Frames damit den Master-Dark normieren:²³

$$Dark_{norm} = \frac{Dark_{t_1} - Bias}{t_1} \quad (15)$$

Dadurch ist es möglich, kürzere Darks aufzunehmen und durch die Bias-Frames auf eine ähnliche Reduktionsqualität zu kommen wie bei gleich lang belichteten Darks. Die Dark-Frames werden normiert um dann mit einer zweiten Belichtungszeit t_2 multipliziert.

$$Light_{Red} = Light_{t_1} - Bias - Dark_{norm} * t_2 \quad (16)$$

²² Vgl. <http://deepskystacker.free.fr>, 2018

²³ Vgl. Breger, 2006

3.2.3 Master Dark

Um eine sehr gute Reduktion zu erzielen, müsste pro Light Frame ein zugehöriges Dark Frame aufgenommen werden. Da bei modernen und gekühlten CCDs der Dunkelstrombeitrag sehr gering ist, wird ein Master Dark aus einer geringeren Anzahl von Dark-Frames erstellt. Ein Medianfilter wird verwendet um Hotpixel und kosmische Strahlen herauszufiltern.²⁴

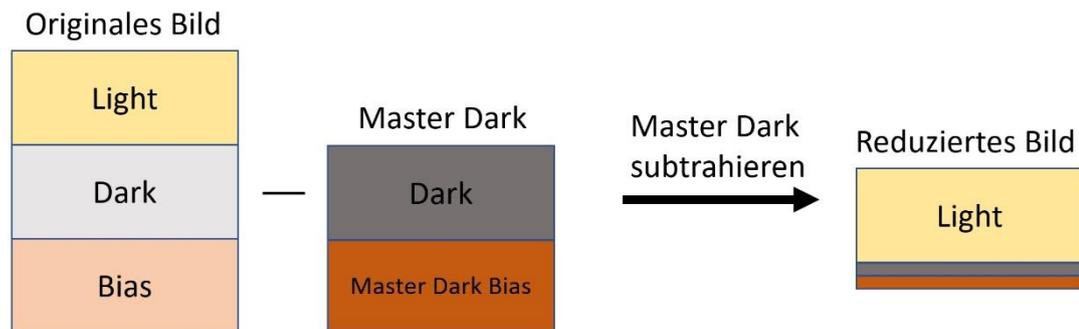


Abbildung 11: Durch Reduktion mit einem Dark Bild wird auch ein geringfügiger Teil Rauschen auf das Light Frame hinzugefügt. Mit einem Master-Dark fällt dieses Rauschen geringer aus.

²⁴ Vgl. Breger, 2006

4 Beobachtungen am Observatorium Lustbühel

Die Beobachtungen fanden am Observatorium Lustbühel in Graz von September 2016 bis Dezember 2016 statt. Das Observatorium befindet sich auf einer Hügellage, etwa 200 m über dem westlich gelegenen Graz, auf einer Seehöhe von 495 m.

4.1 Teleskop und zusätzliches technisches Equipment

Ein 500 mm f/9 Cassegrain Teleskop von Austro Systeme Austria wurde zur Beobachtung verwendet.²⁵ Angeschlossen an das Teleskop war eine CCD Kamera von SBIG STF-8300 mit einer Auflösung von 3326 x 2504 Pixel.²⁶ Alle Bilder wurden mit einem Binning von 3x3 aufgenommen, nur die Aufnahmen von TrES-2 nicht (s. Kapitel 7.2). Das verringert zwar die Auflösung der Pixel auf 0.75" x 0.75" (bei typischem Seeing von 2") und die Größe der Bilder auf 1124 x 850 Pixel, weil Pixel kombiniert werden, erhöht aber das S/N-Verhältnis. Die geringere Auflösung erhöht ebenso die Speichergeschwindigkeit. Durchschnittlich dauerte das Auslesen und Speichern eines Bildes 30 Sekunden (Belichtungszeit lag zwischen 20 Sekunden bei TrES-2 und 90 Sekunden bei HAT-P 19). Der CCD Chip wurde mit Peltier-Elementen auf -10 °C gekühlt, um das thermische Rauschen zu reduzieren.



Abbildung 12: Kamera am 0.5m Teleskop des Observatoriums Lustbühel.

²⁵ Vgl. ASA 500mm f/9 Cassegrain Telescope, 2018

²⁶ Vgl. STF-8300, 2018

4.2 Allgemeiner Beobachtungsprozess

Über mehrere Wochen hinweg wurden potentielle Transitkandidaten notiert. Damit ein Stern als Transitkandidat vorgemerkt wird, sollte dieser, entsprechend der selbst definierten Kriterien, eine maximale Helligkeit von 12 mag aufweisen. Zusätzlich sollte er idealerweise über den gesamten Beobachtungszeitraum hoch über dem Horizont stehen, damit der Einfluss der Atmosphäre (Extinktion und „Seeing“), möglichst gering ausfällt. Ebenso sollten nur Exoplaneten beobachtet werden, welche eine kurze Transitdauer (maximal 3 Stunden) besitzen, damit der gesamte Transit gut verfolgt werden kann. Die Helligkeitsänderung des Transits sollte 2-3% betragen. Je tiefer der Dip desto leichter ist die Auswertung, sollte zum Beispiel schlechtes Wetter die Aufnahmequalität verschlechtern.

In wolkenlosen Nächten wurde dann beobachtet. Eine Stunde vor Transitbeginn wurden die Instrumente aktiviert. Zuerst wurde über die Website <http://var2.astro.cz/ETD/> der Kandidat mit Hilfe von Aufsuchkarten ausfindig gemacht und das Teleskop auf die Koordinaten aus der Datenbank ausgerichtet. Es musste manuell nachjustiert werden, damit das Science-Target genügend weit vom Bildrand entfernt stand. Dadurch wird verhindert, dass durch inkorrekte Nachführung der Stern aus dem Gesichtsfeld läuft. Als Hindernis stellte sich oft die manuelle Nachjustierung heraus. Abhängig von der Himmelsrichtung wo der Stern lag, war sie spiegel- und oder seitenverkehrt. Vor Serienaufnahmestart wurde eine Skizze angefertigt, in welche Richtung nachjustiert werden musste.

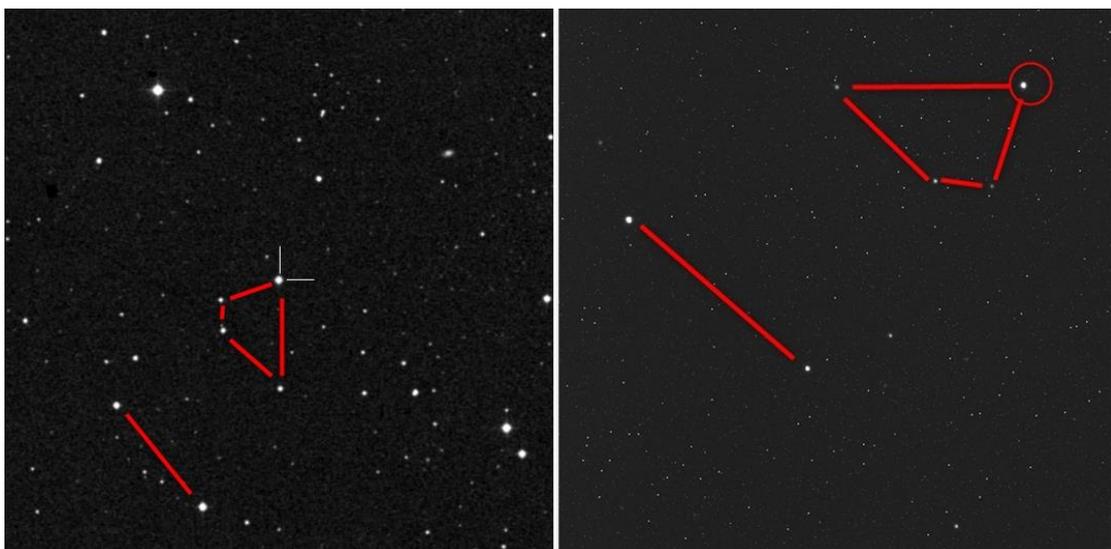


Abbildung 13: Auf der linken Seite eine Darstellung von WASP-52 auf der Website <http://var2.astro.cz/>, auf der rechten Seite eine Aufnahme vom Observatorium Lustbühel. Die roten Linien helfen den korrekten Stern ausfindig zu machen. Rechts ist ebenfalls WASP-52 markiert.

Sobald alles eingerichtet war, wurden die Aufnahmen gestartet. Ziel war es 30 Minuten vor Transitbeginn zu starten. Dadurch konnten etwaige Abweichungen der Transitvorhersage kompensiert werden. Ebenso wird die Auswertung leichter, da nach der differentiellen Photometrie die Nulllinie sichtbar wird. Die Aufnahmeserie wurde eine halbe Stunde nach vorhergesagtem Transitende beendet. Danach wurden noch Dark Frames und Bias Aufnahmen gemacht. Es wurden bei allen fünf Beobachtungen keine Flat-Frames aufgenommen. Für alle Aufnahmen wurde ein r-Sloan Filter verwendet. Die Ergebnisse der Aufnahmen werden in Kapitel 6 „Analyse der Reduktionsverfahren“ behandelt.

5 Datenauswertung

5.1 Python Programm

Zur Auswertung der Daten schrieb ich ein Programm in Python. Es basiert auf diversen Beispielen der „astropy“ Bibliothek²⁷, sowie von Herrn Dr. Thorsten Ratzka zur Verfügung gestelltem IDL Programmcode zur Auswertung von Lichtkurven per differentieller Photometrie. Programmiert wurde unter Windows 10 mit Python 3.6 und der IDE Spyder / Anaconda. Der gesamte Programmcode ist unter <https://github.com/FlorianEnnemoser/Exoplanet-Transit-Lightcurve-Reduction> verfügbar.

5.1.1 Python Bibliotheken

Teilweise sind die Bibliotheken (Libraries) schon im Python Anaconda Paket enthalten, zum Beispiel „matplotlib“ und „astropy“. Zusätzlich wurde die „astropy“ Erweiterung „photutils“²⁸ installiert, um die photometrische Auswertung durchzuführen. Array und Berechnungs-Handling übernahm die „numpy“ Library. Ein rudimentäres Logging und OS Handling wurde ebenso mit den Libraries „logging“ und „os“ eingebaut.

Da das Programm für alle 5 Transits verwendet wurde und einige Parameter öfters angepasst werden mussten, wird ein Input Skript verwendet, über welches verschiedene Parameter gesetzt werden können.

5.1.2 Python Programmcode

5.1.2.1 Programmstart

Zuerst wird das Logging initiiert, da es während der Programmlaufzeit immer benötigt wird. Danach wird abgefragt, ob die Ordner in denen die Daten liegen vorhanden sind. Falls nicht werden diese automatisch erstellt und das Programm bricht ab, damit die Daten dorthin kopiert werden können.

²⁷ Vgl. astropy, 2018

²⁸ Vgl. photutils, 2018

5.1.2.2 Master Dark und Master Bias

Aus dem Input Values File werden die Speicherorte der Dark und Bias Frames geholt und in ein Array eingelesen. Je nach angegebenen Parameter werden die Frames jeweils über Median oder Mittelwert zu einem Masterframe zusammengesetzt.

```
1. if exo_input_values.combo_master_dark == 2:  
2.     dark_master = np.median(dark_cube,axis=0)
```

Das Master-Dark und Master-Bias Bild wird nach fertiger Berechnung in einem Ordner als Bild im .png-Format zur Veranschaulichung gespeichert.

5.1.2.3 Subroutine „fluxtarget“

Die Subroutine „fluxtarget“ wird verwendet um für alle angegebenen Sterne den Fluss zu berechnen. Sie benötigt die Startkoordinaten und den Namen des Sterns (wird nur für Bild und Plot zur Benennung verwendet). Die Startkoordinaten wurden mit Hilfe der Software SAOImage DS9 bestimmt. Es wird ein quadratischer Bereich um den Stern gelegt, damit nicht das gesamte Bildarray eingelesen werden muss. Dieser Bereich wird anhand der gegebenen Startkoordinaten automatisch berechnet.

```
1. def fluxtarget(coord_x_min,coord_x_max,coord_y_min,coord_y_max,name)
```

Innerhalb der fluxtarget Subroutine werden anfänglich die FITS-Format Light Frames eingelesen. Das geschieht über die „astropy“ Funktion „getdata“ und im darauffolgenden Schritt, wieder per Option im Input Values Skript definierbar, werden die Light Frames mit dem Master-Dark reduziert.

```
1. if exo_input_values.dark_red == 1:  
2.     image_data = fits.getdata(images_array[i])- dark_master
```

Nachdem das Bild in Koordinaten eingeschränkt und der Dunkelstrom abgezogen wurde, kann eine Clipping Funktion angewandt werden. Diese subtrahiert entweder den Median, Durchschnittswert, Minimalwert oder einen Sigma-Clip vom anfänglich reduzierten Bild.

```
1. if exo_input_values.median_cut == 1:  
2.     image -= np.median(image)  
3. elif exo_input_values.bias_sigma[0] == 1:  
4.     image = sigma_clip(image,sigma=exo_input_values.bias_sigma[1], iters=exo_input_values.bias_sigma[2])
```

Dann wird über die Funktion „DAOStarFinder“ von photutils der Bildbereich nach einem Stern durchgesucht. Werden Sterne gefunden, so werden diese in ein eigenes Array gespeichert.

```
1. daofind = DAOStarFinder(fwhm=exo_input_values.fwhm, threshold= exo_input_valu
  es.threshold[0] * bkg_sigma[exo_input_values.threshold[1]])
2. sources = daofind(image)
```

Darauffolgend werden die Apertur und der Annulus gesetzt. Die Radien sind frei definierbar. Als Standardwerte wurden mit 4 px für Apertur und 6 px für den inneren und 8 px für den äußeren Annulusradius gute Ergebnisse erzielt. Sind die Radien gesetzt, wird mit der photutils Funktion „aperture_photometry“ eine automatische Apertur Photometrie berechnet.

```
1. apertures = CircularAperture(positions, r= exo_input_values.aperture)
2. annulus_apertures = CircularAnnulus(positions, r_in = exo_input_values.annulu
  s[0] , r_out = exo_input_values.annulus[1] )
3.
4. apers = [apertures, annulus_apertures]
5.
6. phot_table = aperture_photometry(image, apers, method = exo_input_values.meth
  ods[0] ,subpixels=5)
```

Bei der Funktion von „aperture_photometry“ (die NASA- IDL „APER“ Funktion basiert auf der gleichen Logik und erzielt die exakt gleichen Ergebnisse)²⁹ können mehrere Methoden gewählt werden. Diese beeinflussen, welche Pixel innerhalb der Kreisfläche addiert werden und welche nicht berücksichtigt werden.

Der finale Wert wird in einem Array in der Spalte „residual_aperture_sum“ gespeichert.

```
1. flux.append(phot_table['residual_aperture_sum'][0])
```

Wie weiter oben bereits erwähnt, musste die automatische Nachführung manuell nachjustiert werden. In den meisten Fällen wandert der Stern aus dem eingegrenzten Bildbereich. Das lässt sich mit 2 Varianten lösen: Der Bildbereich wird größer gewählt, wodurch die Rechenzeit leicht erhöht wird und eventuell mehrere Sterne gefunden werden können. Das ist gerade in einem Bereich mit hoher Sterndichte ein Problem, da dann manuell überprüft werden muss, welcher Stern das eigentliche Beobachtungsziel ist. Die zweite Möglichkeit ist eine Angabe ab welchen Bildern der zu messende Stern aus dem Bildausschnitt läuft, inklusive der neuen Koordinaten wo er dann zu finden ist. Um die Koordinaten und Anzahl der Bilder zu finden, benötigt es

²⁹ Vgl. V. Bajaj, 2017

allerdings einige Durchläufe. Aufgrund dessen, dass Variante 2 leichter zu programmieren ist und gleiche Ergebnisse liefert, wurde diese auch umgesetzt:

```
1. if i in exo_input_values.i:
2.     coord_x_min = intial_coord_x_min + exo_input_values.shift_x[count]
3.     coord_x_max = intial_coord_x_max + exo_input_values.shift_x[count]
4.     coord_y_min = intial_coord_y_min + exo_input_values.shift_y[count]
5.     coord_y_max = intial_coord_y_max + exo_input_values.shift_y[count]
6.     count += 1
```

Mit den Inputwerten für WASP-52 b:

```
1. i = [50,80,105,124,139,152]
2. shift_x = [30,55,80,100,120,145]
3. shift_y = [-5,-15,-25,-30,-30,-40]
```

Die Subroutine leert am Ende das Bildarray damit das nächste Bild hineingeladen werden kann und gibt nach allen Bildern das „flux“ Array aus. Dieses beinhaltet alle Flusswerte der Apertur.

5.1.2.4 Einlesen des Science Targets und Kalibrator Sterne

Im Programm werden ein Science Target (im Code als „sci“ erkenntlich), der Stern um den sich der Exoplanet bewegt, und zwei Kalibratoren (im Code als „cal1“ und „cal2“ erkenntlich) angegeben.

Die zugehörigen Koordinaten werden im Input Values File angegeben.

```
1. sci_coords = [exo_input_values.sci_coordinates[0], exo_input_values.sci_coord
inates[1]]
2. sci_x_min = sci_coords[0]-exo_input_values.pix_around_star
3. sci_x_max = sci_coords[0]+exo_input_values.pix_around_star
4. sci_y_min = sci_coords[1]-exo_input_values.pix_around_star
5. sci_y_max = sci_coords[1]+exo_input_values.pix_around_star
6. sci_name = exo_input_values.sci_name
```

5.1.2.5 Speichern und Vergleich mit CSV Datei

Es besteht die Möglichkeit die Flusswerte in einer CSV Datei zu speichern, um sie später, mit einer unterschiedlichen Berechnung oder Reduktionsmethode zu vergleichen. Die CSV Datei muss folgende Spalten beinhalten: Aufsteigende Nummer (startend mit 0), Beobachtungszeit (für x-Achse bei Diagrammen), Fluss-Science, Fluss-Calibrator 1, Fluss-Calibrator 2.

5.1.3 Differentielle Photometrie

In einer for-Schleife werden die Flusswerte von Science Target und Kalibrator dividiert. Dadurch erhält man ein Verhältnis welches, normiert, einen relativen, konstanten Fluss von genau 1 geben sollte, wenn kein Transit stattfindet. Findet ein Transit statt, so wird das Verhältnis von $\frac{Flux_{sci}}{Flux_{cal}}$ geringer als 1.

```
1. for x in range(np.size(flux_sci)):
2.
3.     flux_sci_cal1.append((flux_sci[x]/flux_cal1[x]))
```

5.1.3.1 Erstellung der Diagramme

Diagramme zum Flussverhältnis Science / Calibrator 1, Science / Calibrator 2, Calibrator 1 / Calibrator 2 werden mit pyplot erstellt und gespeichert. Falls die Daten mit einer CSV-Datei verglichen werden, kann auch ein Differenz-Diagramm gespeichert werden.

5.1.3.2 Reduktionsverfahren des Programms

Im Appendix ist eine Auflistung und Erklärung aller „Input Values“ und der Reduktionsmöglichkeiten zu finden.

Einige Reduktionsmethoden, eine Kombination aus mehreren Reduktionsmöglichkeiten, wurden getestet und die Ergebnisse werden in Kapitel 6 „Analyse der Reduktionsverfahren“ präsentiert. Die folgende Tabelle der durchgeführten Reduktionsverfahren beschreibt, welche Kombinationen getestet wurden:

Tabelle 1: Auflistung der Reduktionsmethoden und welche Aufnahmen oder Funktionen benötigt werden.

Lights	Master-Dark	Master-Bias	Median Cut	Titel
x				Keine Reduktion
x	x			Standardreduktion
x		x		Bias
x		x	x	Bias und Median
x	x			Anzahl der Dark-Frames reduziert

6 Analyse der Reduktionsverfahren

6.1 WASP-52 (b)

WASP-52 b ist ein im Jahr 2011 durch das SuperWASP-North Observatorium entdeckter Gasplanet. Sein Zentralgestirn liegt in einer Entfernung von $140 \pm 20 pc$ von der Erde und besitzt die Spektralklasse K2V. Die scheinbare Helligkeit beträgt 12 mag – genau am oberen Ende der definierten Beobachtungsparameter.³⁰ Ein zweiter Exoplanet um den Stern wurde bis jetzt noch nicht gefunden.³¹

Die Beobachtung des Planeten hatte folgende Kenndaten:

Tabelle 2: WASP-52 b Beobachtungsdaten³²

Name	WASP-52 b (Peg)
RA (J2000)	23:13:58.76
DEC (J2000)	+08:45:40.60
V (mag)	12.0
dV (mag)	0.0290
Transit Dauer (Minuten)	108.58
Vorhersage Transitstart	2016-09-30 T21:48:00
Vorhersage Transitende	2016-09-30 T23:36:00
Start der Beobachtung	2016-09-30 T21:07:32.369
Ende der Beobachtung	2016-09-30 T23:43:13.469
Belichtungszeit (Sekunden)	50
Filter	r-Sloan
Binning	3x3

³⁰ Vgl. Hébrard, 2012

³¹ Vgl. exoplanet.eu, 2018

³² Vgl. ETD, 2018



Abbildung 14: Position von WASP-52 und die Positionen der beiden Kalibrationssterne.

Abbildung 14 war die erste Teleskopaufnahme, welche zur Analyse von WASP-52 b verwendet wurde.

6.1.1 Keine Reduktion

Es wurde das originale FITs Bild genommen, im Bereich um den Stern normalisiert und dann die photometrische Auswertung gestartet.

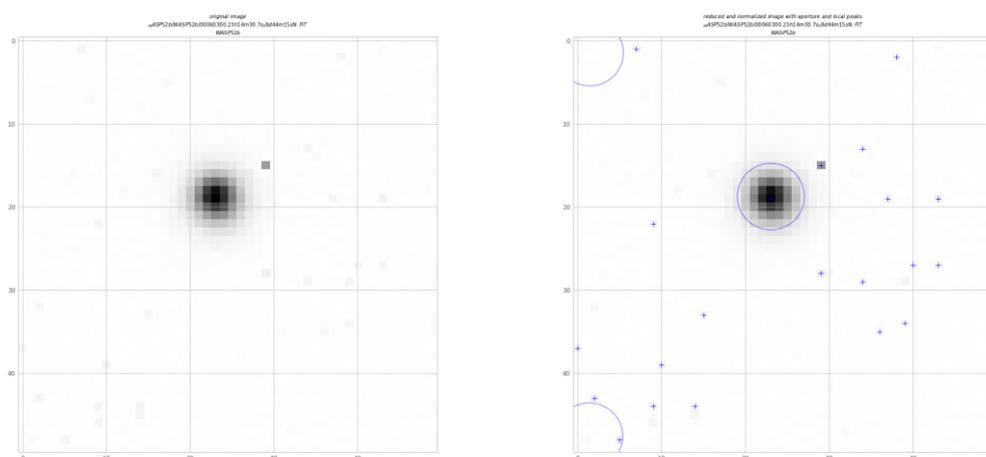


Abbildung 15: Bildausschnitt des nicht reduzierten Bilds von WASP-52 (links) und das Bild mit lokalen Maxima und dem Aperturradius (rechts).

Gut im rechten Bild zu erkennen sind die 3 Aperturen (blaue Kreise). Da die Reduktion durch den Master-Dark fehlt, werden öfters von der Sternsuch-Routine mehrere Signaturen gefunden, die einem Stern ähneln, aber nur Bildartefakte sind. Das führt dann zur Problematik, dass das Programm nicht weiß, welche Apertur die korrekte ist. Um das Problem zu umgehen, wird immer die erste gefundene Apertur ausgewertet. Dadurch kommt das Programm nicht zum Absturz, allerdings können falsche Aperturen ausgewertet werden. Der Fluss von WASP-52 wurde mit dem Kalibratorstern 1 (in Abbildung 14 „Cal1“) verglichen um damit die Lichtkurve zu erhalten. Bei allen in dieser Arbeit beschriebenen Beobachtungen und Reduktionsmethoden wurde immer die Lichtkurve verwendet, welche am ehesten den Transit zeigt.

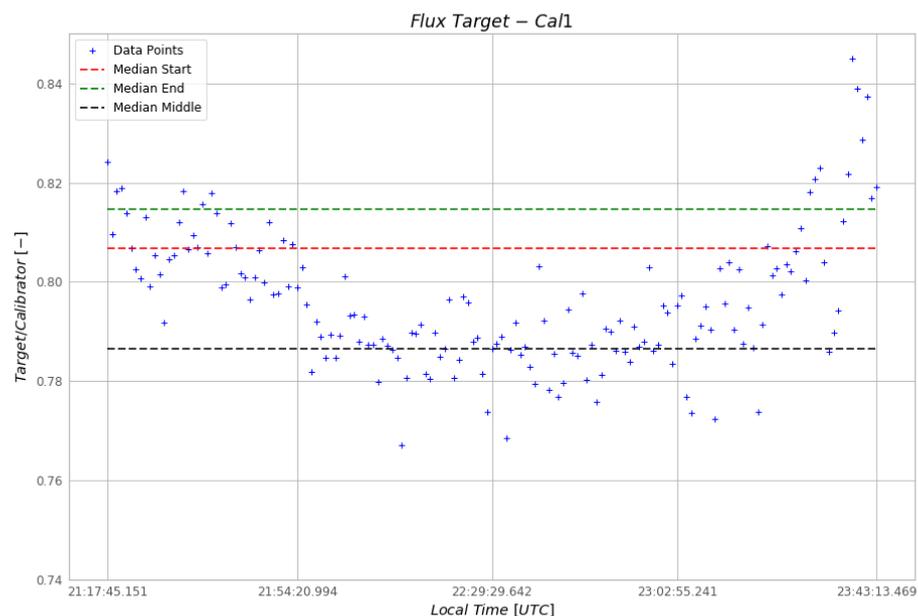


Abbildung 16: Ergebnis der differentiellen Photometrie. Es muss der Grenzwert für die Sternerkennung sehr hochgestellt werden, um zu verhindern, dass Artefakte als „Sterne“ erkannt werden. Dann kann auch ohne Reduktion eine vernünftige Kurve erstellt werden.

Der Dip ist trotzdem ersichtlich, wenn der Grenzwert für die Sternerkennung der „DAOFIND“ Funktion sehr hoch angesetzt ist. Sie musste auf den 35-fachen Wert des Medians des Bildausschnittes gesetzt werden, damit wird verhindert, dass Artefakte oder Hotpixel als Stern erkannt werden. Bei allen anderen Reduktionsmethoden wurde diese Toleranz auf den 20-fachen Wert des Medians des Bildausschnittes gesetzt.

6.1.2 Standardreduktion

Die Standardreduktion wird als die Methode beschrieben, mit der die besten Ergebnisse für die differentielle Photometrie erzielt werden.³³ Ein Master-Dark wird erstellt und abgezogen.

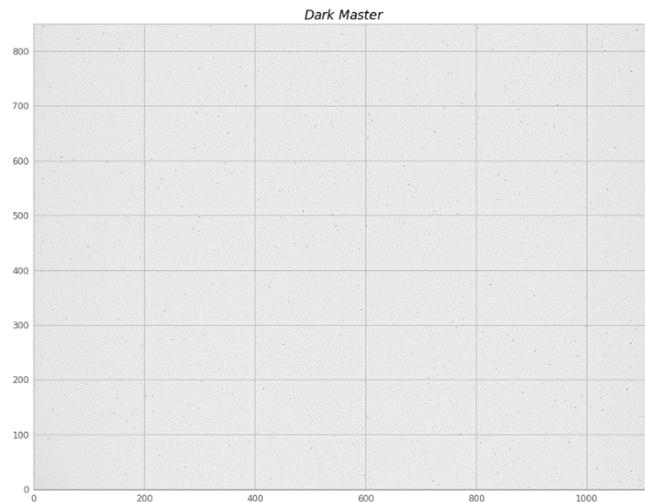


Abbildung 17: Master Dark wird als Summe aller erstellten Dark Frames gespeichert. Es beinhaltet hauptsächlich Hotpixel. Dieses Bild wird dann von den Light-Frames abgezogen.

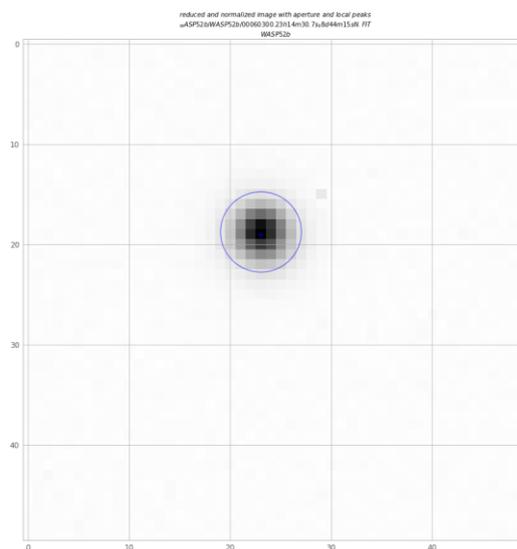


Abbildung 18: Das mit dem Master-Dark reduzierte Bild (wieder WASP-52). Keine multiplen Aperturen, der Stern wird korrekt erkannt. Ebenso werden die Hotpixel (als lokale Maxima erkennbar) größtenteils entfernt.

³³ Vgl. Breger, 2006

Die Standardreduktion schafft es mit einer einzigen Anpassung am Bild, der Subtraktion des Master-Darks ein sehr gutes Ergebnis zu liefern.

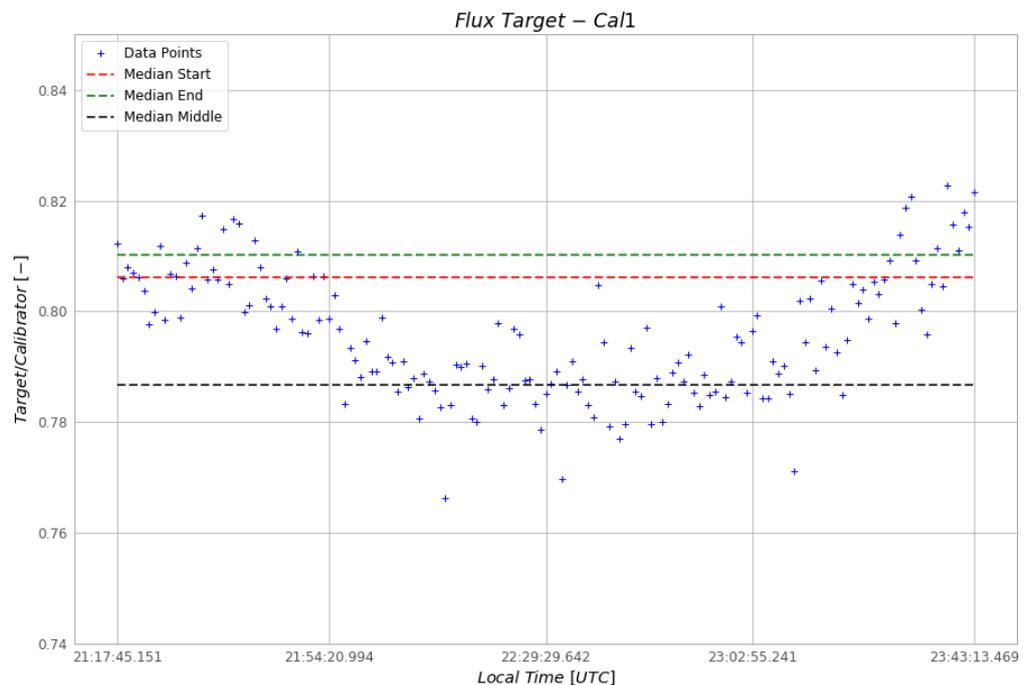


Abbildung 19: Der Transit von WASP-52 b ist eindeutig erkennbar. Die Geraden wurden über einen Median der ersten, letzten und mittleren Flusswerte gebildet.

Die Dauer des Transits kann zwar nicht gut abgelesen, aber auf 100 bis 110 Minuten geschätzt werden – sie stimmt mit den 108 Minuten der Transitvorhersage adäquat überein.

Für die Tiefe des Transits wurde über den Median die ersten beziehungsweise letzten 20 Werte mit dem Median der mittleren 20 Werten verglichen. Minimal- und Maximalwerte zu vergleichen wäre falsch, da es um verrauschte Daten handelt.

Tabelle 3: Verhältnis der Flusswerte mit Standardreduktionsmethode.

$ratio_{start}$	$ratio_{mitte}$	$ratio_{ende}$	$delta_{start-mitte}$	$delta_{ende-mitte}$
0.806	0.786	0.809	0.019	0.022

Die Tiefe des Transits ist im Mittelwert 0.020 , also ein Dip von 2.0%.

6.1.3 Master-Bias Reduktion

Bei der Master-Bias Reduktion bleibt noch der thermische Anteil im Bild. Nur der Bias (Offset) wird abgezogen.

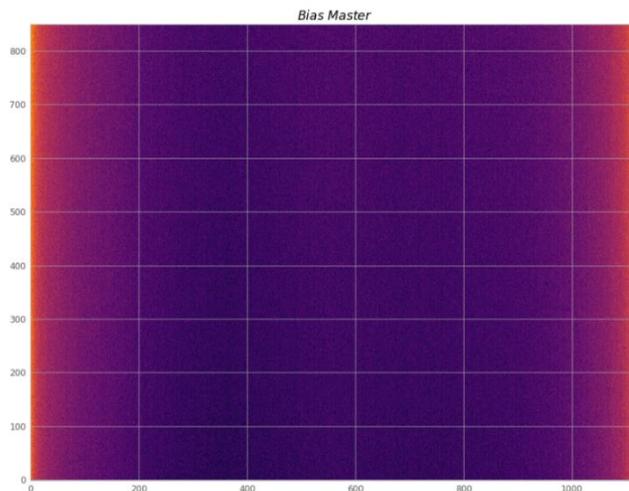


Abbildung 20: Master Bias mit den deutlich „helleren“ Auslesekannten.

Die Lichtkurve sieht der Standardreduktion sehr ähnlich. Vergleicht man die relativen Flusswerte miteinander, so ergibt sich im Median ein Unterschied von lediglich 0.043%. Damit ist diese Reduktionsmethode, bei guten Beobachtungsbedingungen, durchaus ein Ersatz für die Standardreduktion.

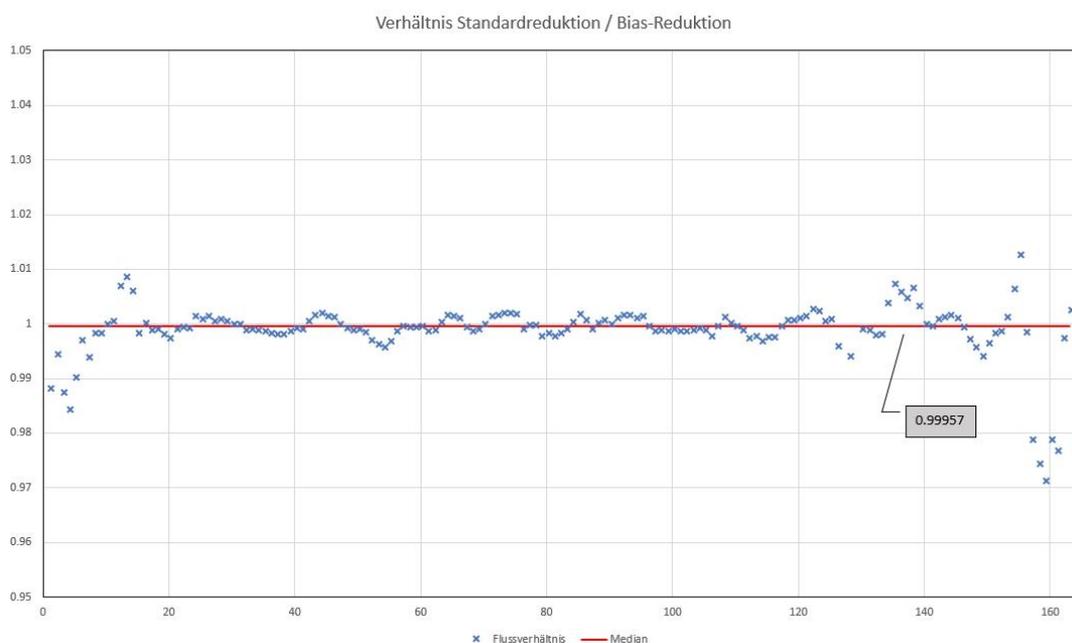


Abbildung 21: Die Abweichungen entstehen dann, wenn der Stern an den Bildrand kommt. Nachdem die Position korrigiert wurde, stehen die Werte wieder fast im Verhältnis 1:1.

6.1.4 Bias und Median

Nachdem der Bias abgezogen wurde, wird der Median des Bildausschnittes errechnet und dann ebenfalls abgezogen. Die Subtraktion des Medianwertes, der annähernd dem Skybackground entspricht, bewirkt eine akzeptable Reduktion.

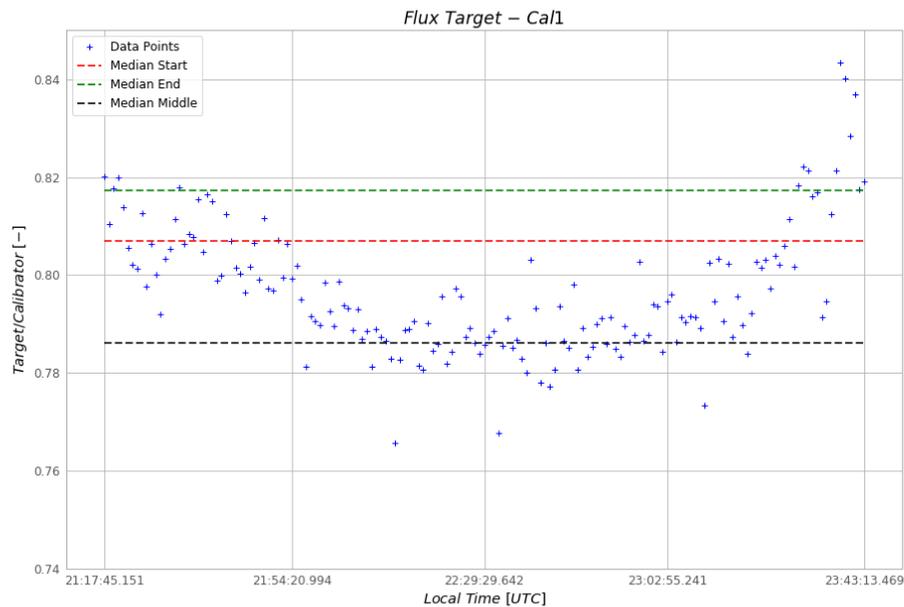


Abbildung 22: Master-Bias und Median Reduktion

Zur Standardreduktionsmethode ergibt sich ein Unterschied im Median von 0.049%. Ein Ersatz der Dark-Frames ist also durchaus denkbar.

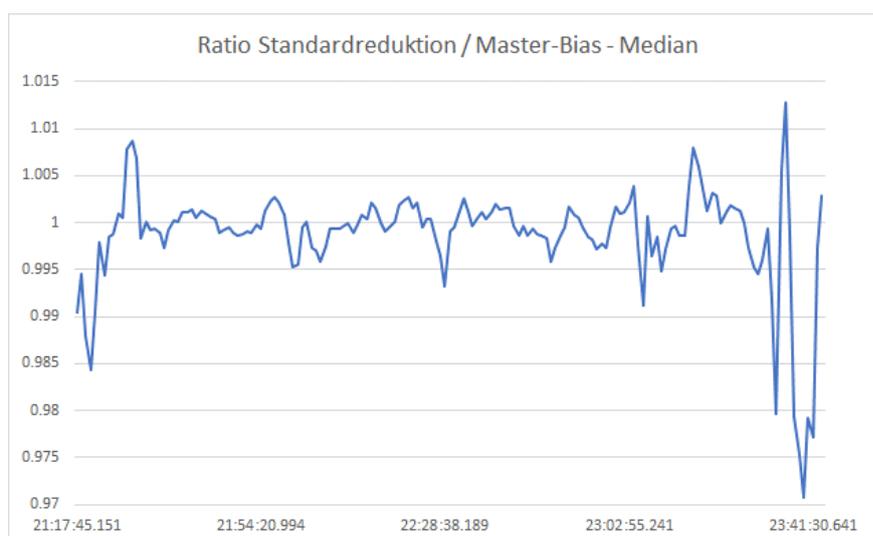


Abbildung 23: Die Peaks, wenn der Bildausschnitt zurück verschoben wird, sind noch immer erkennbar. Teilweise ergibt sich ein Unterschied zur Standardreduktion von 2 bis 3%.

6.1.5 Standardreduktion mit geringerer Anzahl an Dark-Frames im Dark-Master

Wie sich die Anzahl der Dark-Frames im Master-Dark schlussendlich auf die Datenqualität auswirkt, wird hier beschrieben. Dazu wird die Standardreduktion mit einem Master-Frame aus 10 Darks mit der Reduktion durch Master-Darks, die aus weniger Dark-Frames berechnet wurden, verglichen. Getestet wird mit 10, 5, 3, 2 und einem Dark Frame.

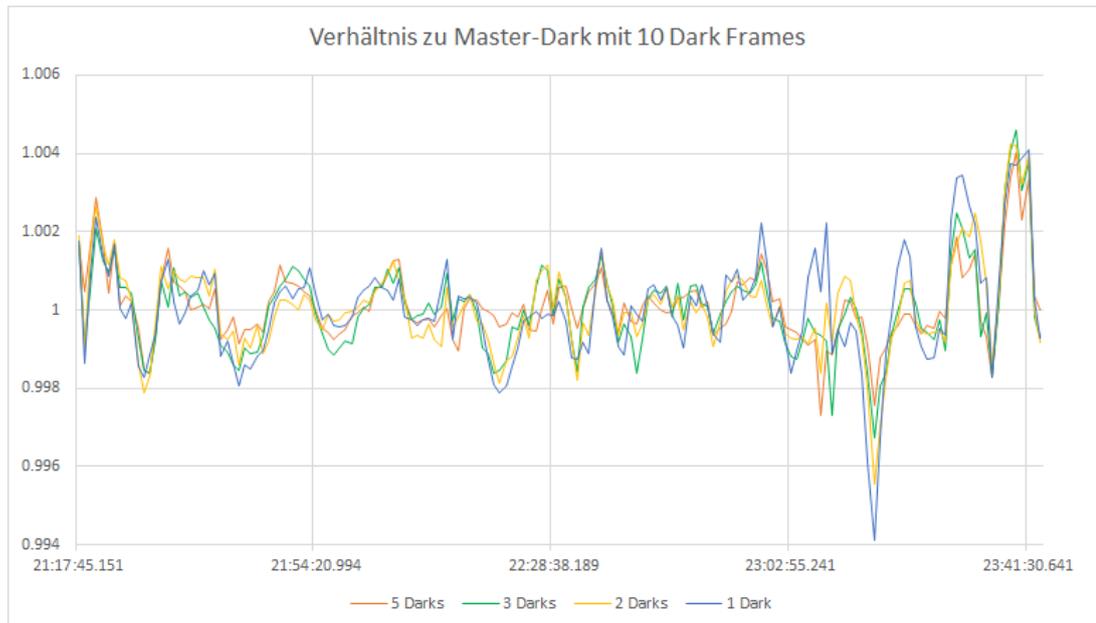


Abbildung 24: Der Unterschied zwischen einem Master-Dark aus 10 Dark-Frames und einem aus nur einem Dark-Frame (reduzierter Bildbereich) liegt bei maximal 0.6 %. Je mehr Darks verwendet werden, desto näher liegt es am vollen Master-Dark

Der Effekt der Rauschreduktion durch Kombination wird bei einer kleinen Anzahl von Dark-Frames besonders deutlich. Das Master-Dark mit 5 Frames hat im Mittel einen relativen Flussunterschied von 0.01%. Im Diagramm ist ebenfalls zu erkennen, dass die Spitzen der Variante mit nur einem Dark Frame größer sind, als bei den anderen Versionen.

6.1.6 Berechnete Planetendaten der verschiedenen Reduktionsmethoden

Da die Reduktionsmethoden unterschiedliche Ergebnisse für den relativen Fluss lieferten, werden in Tabelle 4 die daraus berechneten Planetendaten aufgelistet, um darzustellen, wie diese Ergebnisse beeinflusst werden.

Die Helligkeitsabnahme dV berechnet sich mit Hilfe der Flussverhältnisse von Ziel und Kalibrator über:

$$dV = -2.5 \log\left(\frac{ratio_{mitte}}{ratio_{start}}\right) \quad (17)$$

Den Radius des Planeten erhält man über die Umformung von Formel 1:

$$R_p = \sqrt{\frac{\Delta F}{F} R_*^2} \quad (18)$$

Mit der Annahme, dass es sich um einen kugelförmigen Planeten handelt, kann dann die Dichte berechnet werden. Die Masse des Planeten wurde aus dem NASA Exoplaneten Archiv³⁴ genommen. Die zu Radius und Dichte gehörigen Unsicherheiten werden mit dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$\Delta R_p = \sqrt{\frac{\Delta F}{F}} \Delta R_* \quad (19)$$

und die Unsicherheit bei der Dichte:

$$\Delta \rho_p = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial \rho_p}{\partial R_p}\right| \Delta R_p\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial \rho_p}{\partial M_p}\right| \Delta M_p\right)^2} = \sqrt{\left(\left|\frac{-9M_p}{4\pi R_p^4}\right| \Delta R_p\right)^2 + \left(\left|\frac{3}{4\pi R_p^3}\right| \Delta M_p\right)^2} \quad (20)$$

Die Inklination kann durch Umformung von Formel 11 berechnet werden, da die Transitzeit gemessen wurden und daher bekannt sind:

$$i = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(R_p + R_*)^2 - \left(\sin\left(\frac{\pi t_{ges}}{P}\right) a\right)^2}}{a} \right) \quad (21)$$

Weiterführend kann, mit den Unsicherheiten von Planetenradius und Sternradius die maximale Inklination der Planetenbahn berechnet werden:

$$i_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(R_p + R_* - \Delta R_p - \Delta R_*)^2 - \left(\sin\left(\frac{\pi t_{ges}}{P}\right) a\right)^2}}{a} \right) \quad (22)$$

³⁴ Vgl. NASA Exoplanet Archive, 2018

Tabelle 4: Bahndaten der verschiedenen Reduktionsmethoden.

Attribut	Keine Reduktion	Standard	Bias	Bias Median	2 Darks
dV	0.0328 mag	0.0292 mag	0.0336 mag	0.0354 mag	0.0285 mag
R_p	1.221 R_{21}	1.150 R_{21}	1.236 R_{21}	1.269 R_{21}	1.137 R_{21}
ΔR_p	0.0031 R_{21}	0.0029 R_{21}	0.0031 R_{21}	0.0032 R_{21}	0.0029 R_{21}
ρ_p	334.67 $\frac{kg}{m^3}$	400.53 $\frac{kg}{m^3}$	322.98 $\frac{kg}{m^3}$	298.11 $\frac{kg}{m^3}$	414.88 $\frac{kg}{m^3}$
$\Delta \rho_p$	25.70 $\frac{kg}{m^3}$	30.70 $\frac{kg}{m^3}$	24.81 $\frac{kg}{m^3}$	22.92 $\frac{kg}{m^3}$	31.79 $\frac{kg}{m^3}$
i	87.25°	87.34°	87.23°	87.19°	87.36°
i_{max}	87.56°	87.66°	87.54°	87.50°	87.68°

Anhand der Tabelle wird erkenntlich, dass die berechneten Planeten und Bahndaten trotz geringem Fluss-Unterschied auseinanderdriften. Besonders die Bias-Median Methode „erhöht“ scheinbar den Planetenradius um mehr als 0.1 R_{21} und ist damit keine brauchbare Reduktionsmethode. Dahingegen liefert die Methode mit 2-Dark Frames im Master-Dark zwar unterschiedliche Ergebnisse, jedoch ist der Unterschied um eine Größenordnung geringer als bei Bias-Median.

Die präziseste Methode ist die Standardreduktion. Diese entspricht am ehesten den Werten aus der Exoplaneten Datenbank³⁵ beziehungsweise dem NASA Exoplaneten Archiv³⁶.

³⁵ Vgl. ETD, 2018

³⁶ Vgl. NASA Exoplanet Archive, 2018

6.1.7 Einfluss von Apertur- und Annulus-Radius auf Flusswerte

Der Aperturradius sollte in den meisten Fällen auf den 3-fachen Wert der FWHM gewählt werden.³⁷ In diesem Unterkapitel wird getestet, wie sich eine Apertur und Annulus Änderung von 50% bis 200% auf den Fluss des Ziels (WASP-52) auswirkt.

Die Apertur wurde im vorhergehenden Kapitel auf 4 px festgelegt (≈ 1 FWHM), weil damit bei allen Reduktionsmethoden gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Von diesem Wert wird skaliert. Der Annulus (zuvor ein Radius von 8 Pixel) wird linear mitskaliert. Als Reduktionmethode wird die Standardreduktion verwendet.

Tabelle 5: Fluss Änderung durch Anpassung des Apertur Radius.

Apertur Radius in %	50 %	75 %	100 %	125 %	150 %	200 %
Apertur px	2	3	4	5	6	8
Innen Annulus px	3	4.5	6	7.5	9	12
Außen Annulus px	4	6	8	10	12	16
Median Flux Sci	252616	452468	567191	621499	664744	695952
Flux Änderung	-55 %	-20 %	0 %	10 %	17 %	23 %
Standardabweichung Sci/Cal1	0.019	0.012	0.011	0.011	0.012	0.016

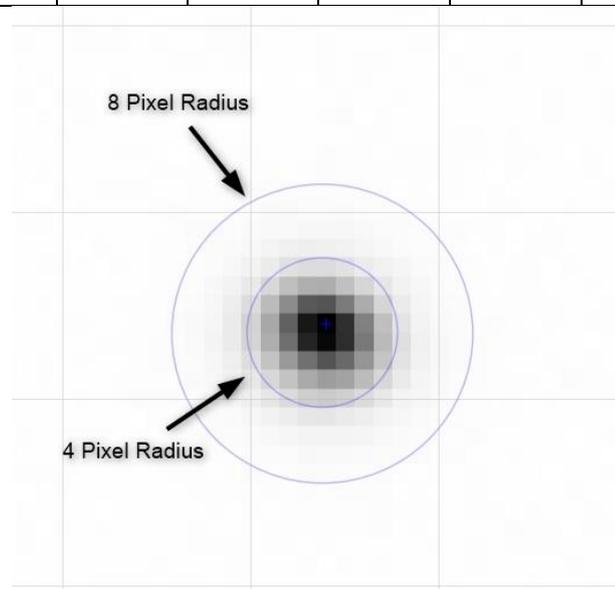


Abbildung 25: Darstellung von WASP-52 und 2 Aperturen, mit 4 und 8 Pixel Radius um das von der "DAOFIND" gefundene Zentrum. Diese Bereiche werden zur Photometrie verwendet.

³⁷ Vgl. Warner, 2006, S. 103

Sehr gut zu erkennen ist die schwache Zunahme des Flusses sobald der Radius der Apertur mehr in den Hintergrund übergeht. Bei einem Radius von 200 % (8 px) erhöht sich der Fluss nur um 23 %, weil hauptsächlich Hintergrund hinzugezählt wird.

Über die Standardabweichung erkennt man, dass von 4 bis 6 Pixel Apertur die Flusswerte sehr nahe beieinander liegen und dadurch die Lichtkurve repräsentativ ist. 6 Pixel Apertur entsprechen genau dem zweifachen Wert der FWHM von 3 px.

6.2 HAT-P 19 (b)

Dieser Exoplanet wurde im Jahr 2010 von Hartman et al. entdeckt.³⁸ Der Planet umkreist einen Stern der Spektralklasse K mit einer Orbitalperiode von 4.01 Tagen und besitzt eine Masse von $0.292 \pm 0.018 M_{\text{Jup}}$.³⁹ Die Magnitude von 12.9 mag liegt höher als der eigentlich definierte Maximalwert von 12.0 mag.

Tabelle 6: Daten von HAT-P 19 aus der ETD und den FITs Headern.⁴⁰

Name	HAT-P 19 b (And)
RA (J2000)	00:38:04.07
DEC (J2000)	+34:42:42.2
V (mag)	12.901
dV (mag)	0.0215
Transit Dauer (Minuten)	170.2
Vorhersage Transitstart	2016-11-28 T17:36:00
Vorhersage Transitende	2016-11-28 T20:26:00
Start der Beobachtung	2016-11-28 T19:26:53.833
Ende der Beobachtung	2016-11-28 T21:25:44.487
Belichtungszeit (Sekunden)	60
Filter	r-Sloan
Binning	3x3

³⁸ Vgl. Hartman, 2010

³⁹ Vgl. Seeliger et al., 2015

⁴⁰ Vgl. ETD, 2018

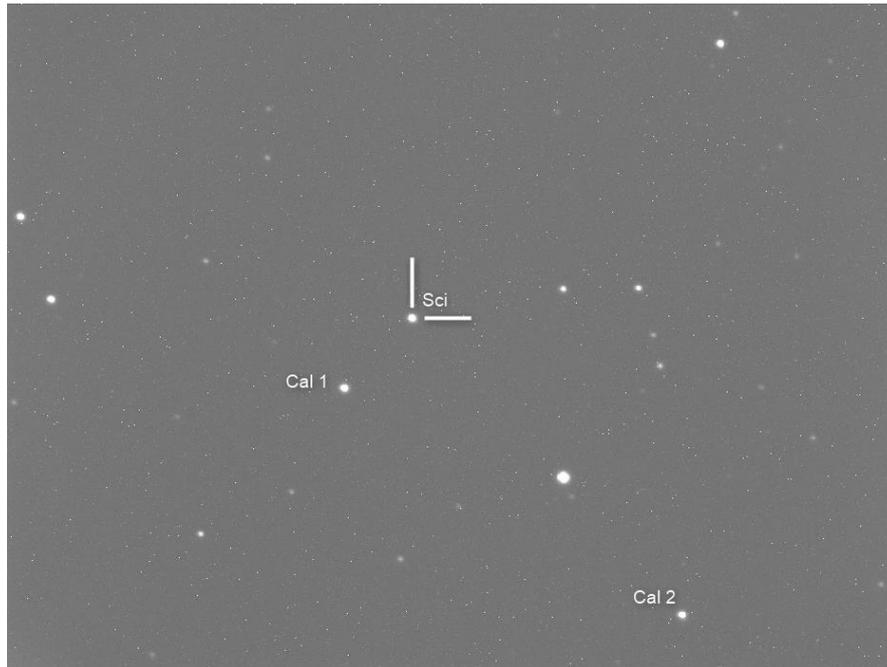


Abbildung 26: HAT-P 19 und Kalibrationssterne, welche aufgrund ihrer ähnlichen Helligkeit zu HAT-P 19 gewählt wurden.

6.2.1 Reduktionsmethoden

Alle bei WASP-52 angewandten Reduktionsmethoden wurden auch bei HAT-P 19 verwendet. Die Unterschiede sind ähnlich dazu. Die Standardreduktion liefert eine brauchbare Lichtkurve.

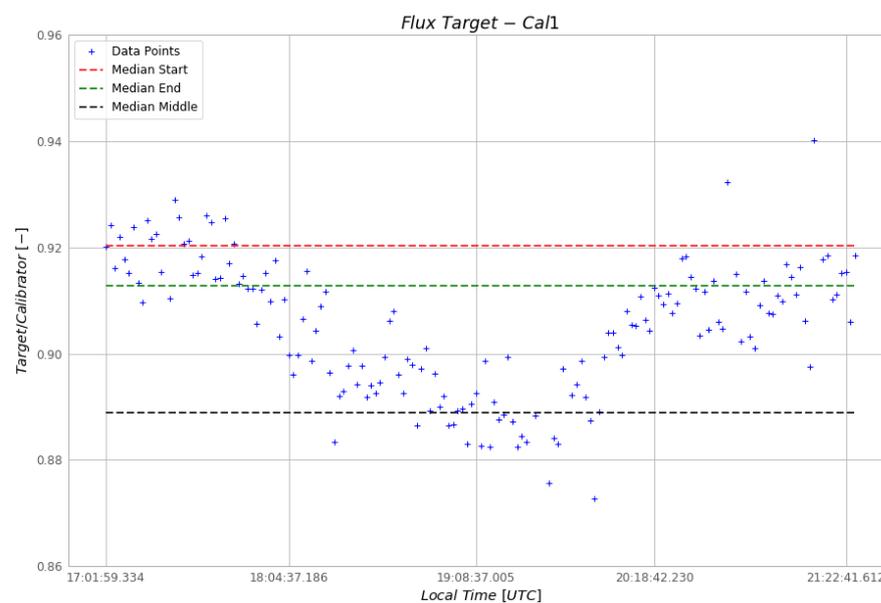


Abbildung 27: Lichtkurve von HAT-P 19 per Standardreduktion. Die Dauer des Transits ist ca. 180 Minuten – dies entspricht auch sehr gut den Daten aus der ETD.

6.2.2 Berechnete Planetendaten von HAT-P 19 b

Die Diskrepanz zwischen Literatur und den hier berechneten Daten ist wesentlich größer als bei WASP-52 b. Die Magnitudenreduktion liegt bei allen Reduktionstypen um ca. 1 *mag* höher, als der, durch viele Papers angegebene Wert von 0.0215 *mag*.⁴¹ Da ein tieferer Dip auch einen größeren Planetenradius bedeutet, wird auch die berechnete Dichte extrem gering.

Tabelle 7: Bahndaten von HAT-P 19 b anhand verschiedener Reduktionsmethoden.

Attribut	Keine Reduktion	Standard	Bias	Bias Median	2 Darks
dV	0.0548 <i>mag</i>	0.0334 <i>mag</i>	3.3389 <i>mag</i>	0.0346 <i>mag</i>	0.0341 <i>mag</i>
R_p	1.824 R_{2l}	1.359 R_{2l}	34.95 R_{2l}	1.384 R_{2l}	1.373 R_{2l}
ΔR_p	0.0107 R_{2l}	0.0080 R_{2l}	0.2056 R_{2l}	0.0081 R_{2l}	0.0080 R_{2l}
ρ_p	63.83 $\frac{kg}{m^3}$	154.04 $\frac{kg}{m^3}$	0.009 $\frac{kg}{m^3}$	145.89 $\frac{kg}{m^3}$	149.58 $\frac{kg}{m^3}$
$\Delta \rho_p$	11.38 $\frac{kg}{m^3}$	27.22 $\frac{kg}{m^3}$	0.02 $\frac{kg}{m^3}$	25.79 $\frac{kg}{m^3}$	26.44 $\frac{kg}{m^3}$
i	88.15 °	88.85 °	69.35 °	88.80 °	88.82 °
i_{max}	89.11 °	> 90.00 °	70.67 °	> 90.00 °	> 90.00 °

In Abbildung 27 ist erkennbar, dass die Lichtkurve am Transitstart höher liegt als am Transitende. Das liegt daran, dass der Stern (und der gesamte Sternenhimmel) durch die Erdrotation scheinbar auf- bzw. untergeht. Dadurch hatten der Stern und die Kalibratoren zu Transitstart eine höhere Deklination als zu Transitende, wodurch das Licht der Sterne weniger weit durch die Atmosphäre musste. Aufgrund unterschiedlicher, wellenlängenabhängiger Extinktion von HAT-P 19 und dem Kalibratorstern, ändert sich das Flussverhältnis. Somit ist der Fluss-Median zu Anfang der Beobachtungen nicht gleich dem Fluss-Median zu Beobachtungsende. Wenn der relative Flux am Tiefpunkt mit dem Transitstart oder -ende verglichen wird, wäre das Flussdelta respektive größer oder kleiner. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird immer mit dem Mittelwert der Magnitudenreduktion gerechnet.

⁴¹ Vgl. Seeliger et al., 2015

6.3 TrES-5 (b)

Der Exoplanet wurde 2011 von Mandushev et al. mit Teleskopen des TrES-Programms nachgewiesen.⁴² Auch bei TrES-5 b handelt es sich um einen Hot Jupiter der seinen Stern in 1.48 Tagen in einem Abstand von 0.02446 AU umkreist. Die Masse wird auf $1.778 \pm 0.063 M_{\text{J}}$ geschätzt. In der Exoplaneten-Datenbank „Exoplanet.eu“ als auch im ersten Paper zum Planeten wird er ebenfalls nicht mit einem „b“ gekennzeichnet.⁴³ Um der astronomischen Nomenklatur treu zu bleiben, wird der Planeten als TrES-5 b bezeichnet.

Tabelle 8: Planeten und Beobachtungsdaten von TrES-5 b.

Name	TrES-5 b (Cyg)
RA (J2000)	20:20:53.00
DEC (J2000)	+59:26:57.00
V (mag)	13.72
dV (mag)	0.0215
Transit Dauer (Minuten)	111.312
Vorhersage Transitstart	2016-10-31 T16:07:00
Vorhersage Transitende	2016-10-31 T17:37:00
Start der Beobachtung	2016-10-31 T17:50:21.715
Ende der Beobachtung	2016-10-31 T20:31:25.878
Belichtungszeit (Sekunden)	60
Filter	r-Sloan
Binning	3x3

⁴² Vgl. Mandushev et al., 2011

⁴³ Vgl. ebda.

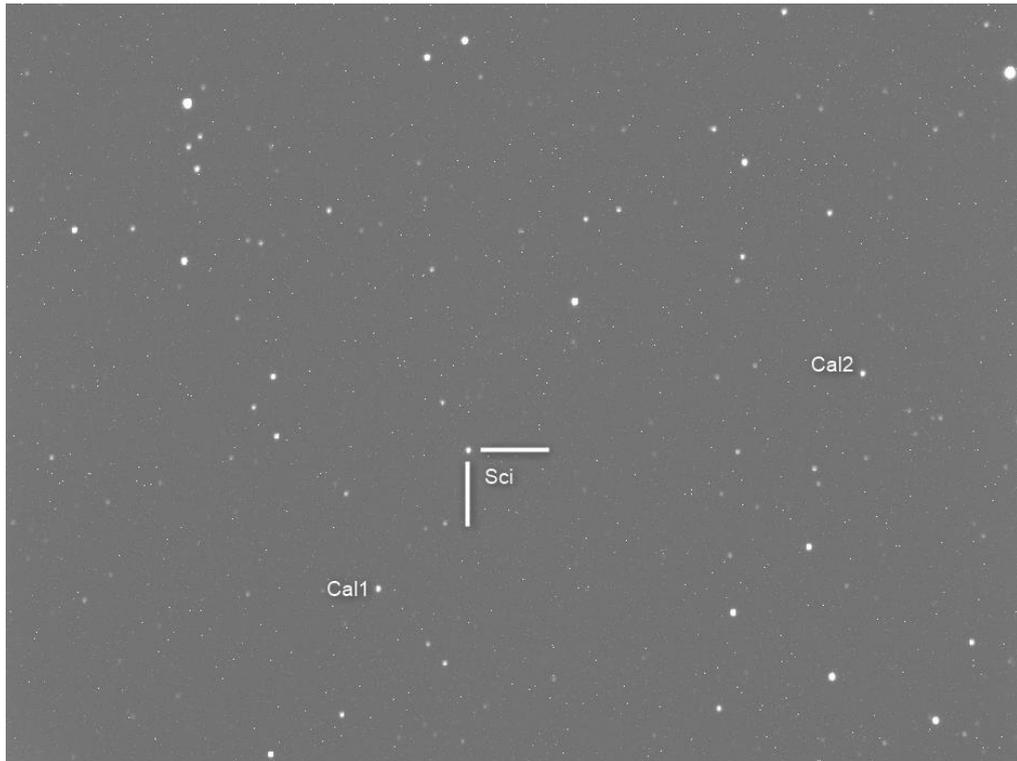


Abbildung 28: Positionen des Targets und der Kalibrator Sterne.

Trotz der geringen Helligkeit von 13.72 mag wird die Lichtkurve mit den allen hier beschriebenen Reduktionsvarianten sichtbar.

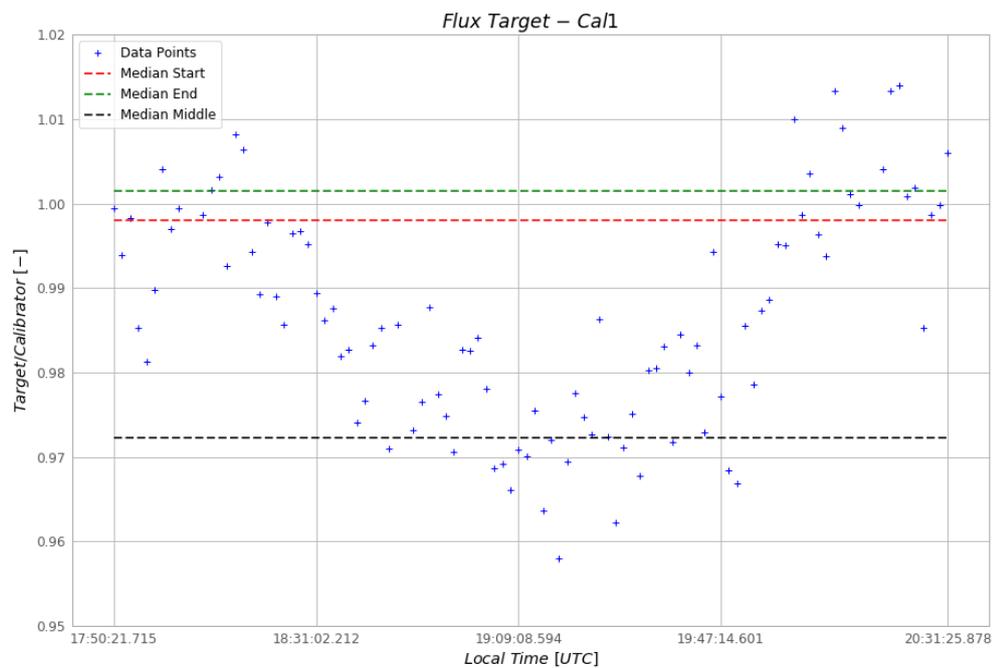


Abbildung 29: Lichtkurve von TrES-5. Trotz der geringen Helligkeit von über 13 mag ist der Transit erkennbar.

6.3.1 Berechnete Planetendaten

Entgegen der Vermutung, dass das Lustbühl-Teleskop möglicherweise nicht mit der geringen Helligkeit von TrES-5 zurechtkommt, sind die berechneten Daten von TrES-5 b ähnlich der in der Literatur. Die Reduktion der Helligkeit durch den ca. 115 Minuten langen Transit liegt um mehr als 80 mmag über den durch die Exoplanet Transit Database angegebenen Wert von 0.0215 mag .

Tabelle 9: Berechnete Planetendaten von TrES-5.

Attribut	Keine Reduktion	Standard	Bias	Bias Median	2 Darks
dV	0.0334 mag	0.0297 mag	0.0327 mag	0.0321 mag	0.0303 mag
R_p	$1.500 R_{\text{J}}$	$1.416 R_{\text{J}}$	$1.484 R_{\text{J}}$	$1.470 R_{\text{J}}$	$1.430 R_{\text{J}}$
ΔR_p	$0.0023 R_{\text{J}}$	$0.0021 R_{\text{J}}$	$0.0022 R_{\text{J}}$	$0.0022 R_{\text{J}}$	$0.0021 R_{\text{J}}$
ρ_p	$699.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$829.74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$720.71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$741.64 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$806.35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\Delta \rho_p$	$31.87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$37.76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$32.85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$33.79 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$36.70 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
i	86.71°	86.83°	86.74°	86.75°	86.81°
i_{max}	86.92°	87.04°	86.95°	86.96°	87.02°

7 Nicht erfolgreiche Beobachtungen

Neben den Beobachtungen von WASP-52, HAT-P 19 und TrES-5 wurden ebenfalls die Sterne KELT-16 und TrES-2 beobachtet, auch mit dem Ziel einen Transit zu beobachten.

7.1 KELT-16 (b)

Die Light-Aufnahmen von KELT-16 sind zu Beginn etwas unscharf. Daher kann die DAOFIND Funktion, auch nach verschiedenen Tests, wo die Empfindlichkeit und die FWHM auf die Größe des Sterns angepasst wurde, den Stern nicht ausfindig machen. Das erkennt man sehr gut im Flussdiagramm des Sterns. Etwa das erste Drittel der Aufnahmen hat einen sehr geringen Fluss, weil nur Hintergrund erkannt wurde. Danach wurde der Stern korrekt von der DAOFIND Funktion gefunden und ein passender Fluss gemessen.

Tabelle 10: Planeten und Beobachtungsdaten von KELT-16 b.⁴⁴

Name	KELT-16 b (Cyg)
RA (J2000)	20:57:04.40
DEC (J2000)	+31:39:39.60
V (mag)	11.72
dV (mag)	0.0124
Transit Dauer (Minuten)	149.3
Vorhersage Transitstart	2016-11-21 T18:01:00
Vorhersage Transitende	2016-11-21 T20:30:00
Start der Beobachtung	2016-11-21 T17:56:59.028
Ende der Beobachtung	2016-11-21 T21:02:29.928
Belichtungszeit (Sekunden)	60
Filter	r-Sloan
Binning	3x3

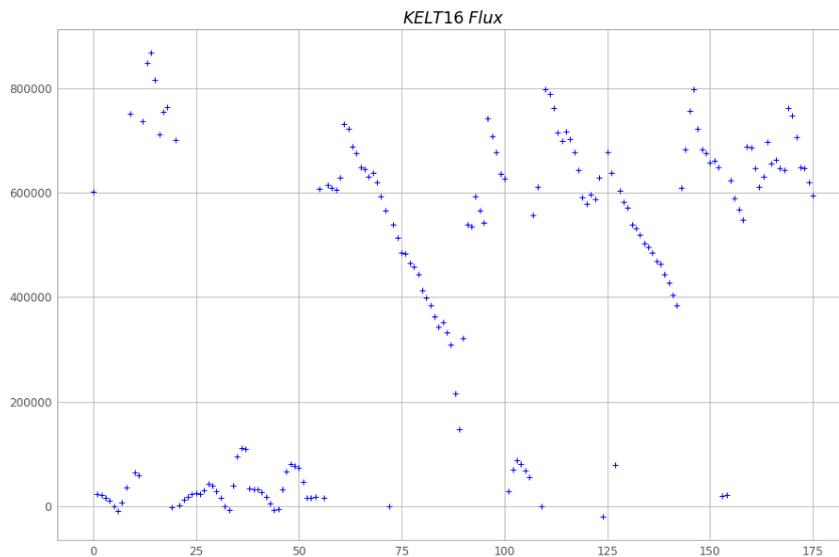


Abbildung 30: Fluss von KELT-16. Im ersten Drittel wurde nur Hintergrund gemessen, weil der Stern zu unscharf war.

Weil das erste Drittel der Light Bilder von KELT-16 keine passenden Ergebnisse für die differentielle Photometrie lieferte, kann keine aussagekräftige Lichtkurve gemessen werden.

⁴⁴ Vgl. ETD, 2018

Es ist zwar ein Anstieg von der Mitte bis zum Ende der Aufnahmen erkennbar, dies könnte allerdings auch an der Extinktion liegen.

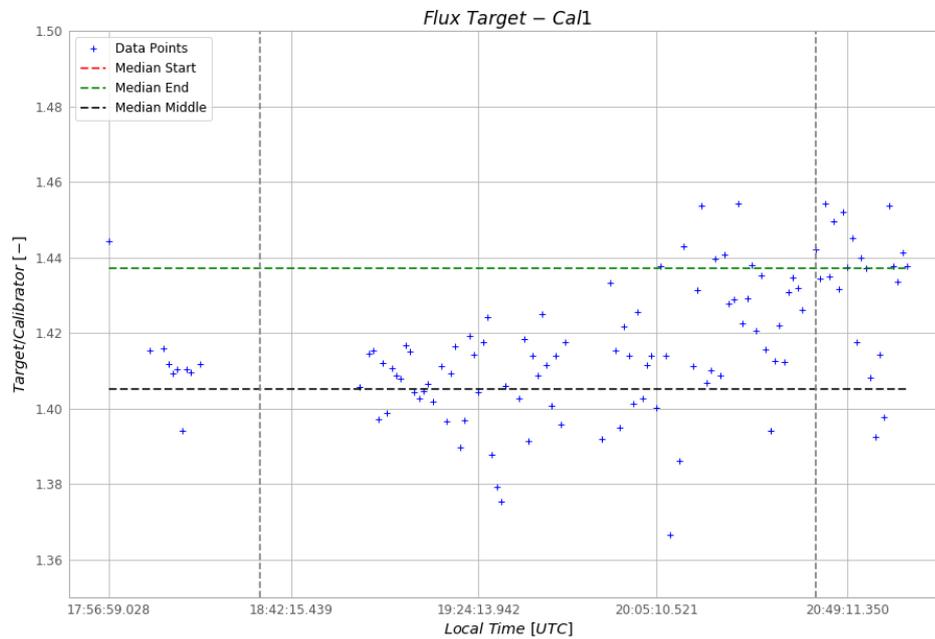


Abbildung 31: Lichtkurve von KELT-16.

7.2 TrES-2 (b)

Bei den Aufnahmen von TrES-2 wurde auf Dark Frames verzichtet. Es konnten auch keine anderen Dark-Frames verwendet werden, da die Aufnahmen mit einem 2x2 Binning anstatt einem 3x3 Binning aufgenommen wurden. Das vergrößert die Auflösung des Bildes und daher kann dann kein Dark mit geringerer Auflösung zur Reduktion verwendet werden. Eine Standardreduktion ist dann nicht möglich. Ebenfalls wurde das Bild nicht scharf gestellt und der Stern besitzt am Bild keine kreisähnliche Form. Das macht eine Auswertung mit der DAOFIND Funktion sehr schwierig.

Tabelle 11: Planeten und Beobachtungsdaten von TrES-2 b.⁴⁵

Name	TrES-2 b (Dra)
RA (J2000)	19:07:14.00
DEC (J2000)	+49:18:59.00
V (mag)	11.41
dV (mag)	0.0169
Transit Dauer (Minuten)	90.0
Vorhersage Transitstart	2016-09-09 T18:55:00
Vorhersage Transitende	2016-09-09 T20:25:00
Start der Beobachtung	2016-09-09 T19:16:26.608
Ende der Beobachtung	2016-09-09 T21:02:29.928
Belichtungszeit (Sekunden)	20
Filter	r-Sloan
Binning	2x2

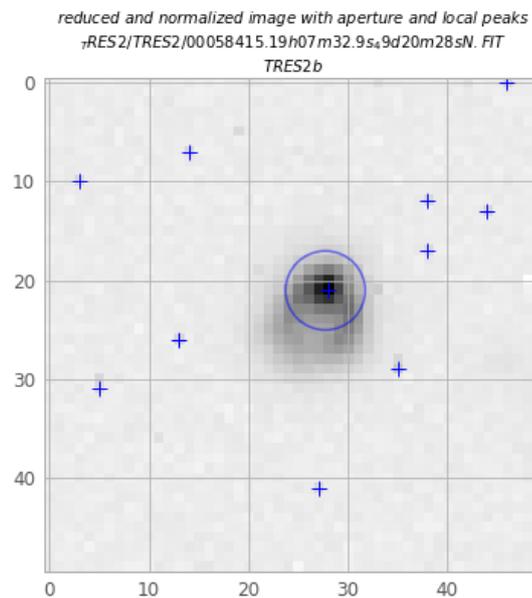


Abbildung 32: TrES-2, bereits durch ein Master-Bias reduziert.

Der Transitbeginn war mit 18:55 UTC vorhergesagt⁴⁶, die Beobachtung wurde jedoch erst um 19:16 UTC gestartet. Zusammen mit einem eher schlechten Beobachtungswetter (hohe

⁴⁵ Vgl. ETD, 2018

⁴⁶ Vgl. ebda.

Cirren) haben diese Faktoren die Lichtkurve so stark beeinflusst, dass kein Transit von TrES-2 b sichtbar war.

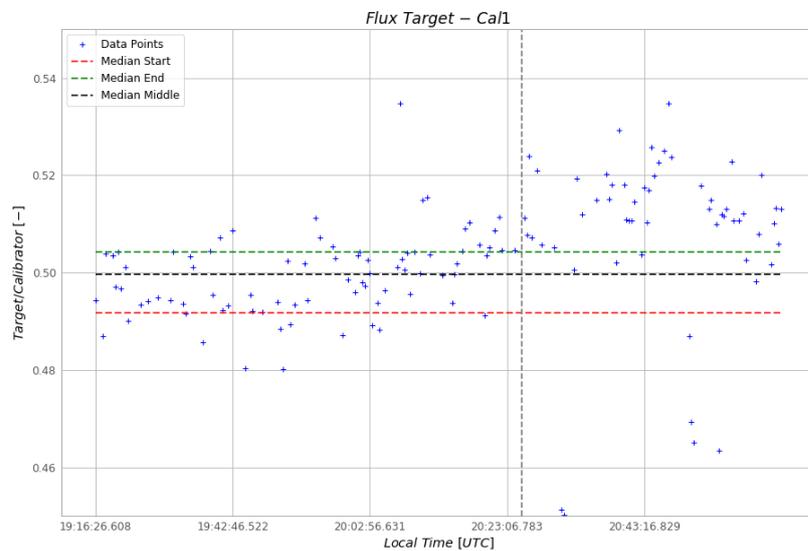


Abbildung 33: Lichtkurve von TrES-2. Die horizontale graue Linie ist das vorhergesagte Transitende um 20:25 UTC +2.

8 Zusammenfassung und Aussichten

Um eine korrekte Reduktion gewährleisten zu können, sollten hinreichend viele Dark-Frames aufgenommen werden. Als ungenauere Alternative könnte auch die Bias-(Median) Methode gewählt werden.

Zu testen bleibt, ob wie in Kapitel 3.2 „Bildreduktion“ besprochen, durch kürzere Belichtungszeiten aufgenommene Dark-Frames und mit Bias normierte Master-Darks eine ähnliche Reduktion liefern wie eine größere Anzahl Dark-Frames. Ebenfalls könnte mit der Reduktion von Flat-Frames die letzten möglichen Sensorungenauigkeiten korrigiert werden.

Das Python Programm kann in viele Richtungen erweitert werden. Das Hauptproblem besteht darin, dass kein Sterntracking, analog am Teleskop oder digital im Programmcode, eingebaut ist. Ein solches Tracking verhindert das Hinauswandern des Sterns aus dem Bildbereich. Damit würden die Flusswerte kontinuierlich gut gemessen werden. Mit analogem und (oder) digitalem Tracking des Sterns könnte die Auswertung wesentlich verbessert werden.

Ebenso ist ein Hinzufügen eines Linear Fits denkbar, damit der Auf- und Untergang eines Sterns bei der Berechnung der Transittiefen korrekt berücksichtigt wird.

9 Literaturverzeichnis

- ASA 500mm f/9 Cassegrain Telescope.* (2018). Von <https://telescopes.net/store/asa-500mm-f-9-cassegrain-telescope-open-truss-tube.html> abgerufen
- astropy.* (2018). Von <http://www.astropy.org/> abgerufen
- Breger, M. (2006). <http://homepage.univie.ac.at>. Von http://homepage.univie.ac.at/michel.breger/lehre/AI2/instrumente2_dateien/CCDR_educAusw_1_SS06.pdf abgerufen
- ETD.* (2018). Von <http://var2.astro.cz/ETD/> abgerufen
- exoplanet.eu.* (2018). Von <http://exoplanet.eu/catalog/> abgerufen
- Hartman, J. (2010). *Blend Analysis of HATNet Transit Candidates.*
- Haswell, C. A. (2010). *Transiting Exoplanets.* United States of America, New York: Cambridge University Press.
- Hébrard. (2012). *WASP-52b, WASP-58b, WASP-59b, and WASP-60b: four new transiting close-in giant planets.*
- <http://deepskystacker.free.fr>. (2018). Von <http://deepskystacker.free.fr/english/theory.htm> abgerufen
- <https://www.spacetelescope.org>. (2018).
<https://www.spacetelescope.org/images/heic0821c/>.
- Lillo-Box, J. (2015). *Kepler-447b: a hot-Jupiter with an extremely grazing transit.*
- Mandushev et al. (2011). *TrES-5: A Massive Jupiter-sized Planet Transiting A Cool G-dwarf.*
- NASA Exoplanet Archive.* (2018). Von <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> abgerufen
- photutils.* (2018). Von <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/> abgerufen
- Seager, S. (2010). *Exoplanets.* The University of Arizona Press, Tucson: The Arizona Board of Regents.
- Seeliger et al. (2015). *Ground-based transit observations of the HAT-P-18, HAT-P-19, HAT-P-27/WASP40 and WASP-21 systems.*
- STF-8300.* (2018). Von <http://diffractionlimited.com/product/stf-8300/> abgerufen

V. Bajaj, H. (2017). *Comparing Aperture Photometry Software Packages*. Baltimore: Space Telescope Science Institute. Von

<http://www.stsci.edu/hst/wfc3/documents/ISRs/WFC3-2017-10.pdf> abgerufen

Warner, B. D. (2006). *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*. Colorado: Springer.

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Reduktionsmethoden und welche Aufnahmen oder Funktionen benötigt werden.	22
Tabelle 2: WASP-52 b Beobachtungsdaten	23
Tabelle 3: Verhältnis der Flusswerte mit Standardreduktionsmethode.	27
Tabelle 4: Bahndaten der verschiedenen Reduktionsmethoden.	32
Tabelle 5: Fluss Änderung durch Anpassung des Apertur Radius.....	33
Tabelle 6: Daten von HAT-P 19 aus der ETD und den FITs Headern.....	34
Tabelle 7: Bahndaten von HAT-P 19 b anhand verschiedener Reduktionsmehtoden.	36
Tabelle 8: Planeten und Beobachtungsdaten von TrES-5 b.....	37
Tabelle 9: Berechnete Planetendaten von TrES-5.	39
Tabelle 10: Planeten und Beobachtungsdaten von KELT-16 b.	40
Tabelle 11: Planeten und Beobachtungsdaten von TrES-2 b.....	42

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kumulierte Histogramm-Darstellung der bestätigten Exoplaneten. Im Jahr 2018 wird es über 4000 bestätigte Exoplaneten geben.	2
Abbildung 2: Fomalhaut-System mit dem Inset des Planeten Fomalhaut b. Der schwarze Bereich in der Mitte ist der durch den Coronagraph abgedeckte Bereich. Das Bild ist eine Montage aus B, V und I Band-Aufnahmen des Hubble Space Telescopes.	4
Abbildung 3: Je größer der Planetenradius, desto größer fällt der Dip in der Lichtkurve aus. Besonders bei Sternen mit geringem Radius können bei Planeten in Jupitergröße mehr als 5 % Lichtverlust beobachtet werden.	6
Abbildung 4: Geometrische Veranschaulichung, wie die Inklination der Planetenbahn die Sichtbarkeit eines Transits beeinflusst. Wenn die Inklination relativ zum Beobachter zu klein ist, ist kein Transit beobachtbar. Grafik angelehnt an Haswell, 2010, S. 41.	7
Abbildung 5: „Seitenansicht“ des Transits. Um die Berechnungen so einfach wie möglich zu halten, wird die Bahn als kreisförmig angenommen. Grafik angelehnt an Haswell, 2010, S. 41.	7
Abbildung 6: Exponentieller Abfall der Wahrscheinlichkeit eines Transits. Ab ca. 2.5 AU ist die Wahrscheinlichkeit bei jeder Hauptreihen-Spektralklasse unter 1%. Transits von Planeten, die sich in einer Umlaufbahn von mehr als 10 AU befinden, sind sehr unwahrscheinlich.	8
Abbildung 7: Zeitpunkte eines Transits. b ist der Stoßparameter.	9
Abbildung 8: An Punkt A und B schneiden sich die Lichtstrahlen mit dem Orbit. Grafik angelehnt an Haswell, 2010.	9
Abbildung 9: Reduziertes Bild von HAT-P 19. Der Messbereich, Apertur, ist als blauer Kreis dargestellt.	12
Abbildung 10: Einfacher Reduktionsprozess ohne Flatfield. Das Light (oder auch Science Frame genannt) wird reduziert, indem der Dark-Frame, bestehend aus Dark + Bias vom originalen Bild abgezogen wird.	12
Abbildung 11: Durch Reduktion mit einem Dark Bild wird auch ein geringfügiger Teil Rauschen auf das Light Frame hinzugefügt. Mit einem Master-Dark fällt dieses Rauschen geringer aus.	14
Abbildung 12: Kamera am 0.5m Teleskop des Observatoriums Lustbühel.	15
Abbildung 13: Auf der linken Seite eine Darstellung von WASP-52 auf der Website http://var2.astro.cz/ , auf der rechten Seite eine Aufnahme vom Observatorium Lustbühel. Die roten Linien helfen den korrekten Stern ausfindig zu machen. Rechts ist ebenfalls WASP-52 markiert.	16

Abbildung 14: Position von WASP-52 und die Positionen der beiden Kalibrationssterne.	24
Abbildung 15: Bildausschnitt des nicht reduzierten Bilds von WASP-52 (links) und das Bild mit lokalen Maxima und dem Aperturradius (rechts).....	24
Abbildung 16: Ergebnis der differentiellen Photometrie. Es muss der Grenzwert für die Sternerkennung sehr hochgestellt werden, um zu verhindern, dass Artefakte als „Sterne“ erkannt werden. Dann kann auch ohne Reduktion eine vernünftige Kurve erstellt werden.	25
Abbildung 17: Master Dark wird als Summe aller erstellten Dark Frames gespeichert. Es beinhaltet hauptsächlich Hotpixel. Dieses Bild wird dann von den Light-Frames abgezogen.	26
Abbildung 18: Das mit dem Master-Dark reduzierte Bild (wieder WASP-52). Keine multiplen Aperturen, der Stern wird korrekt erkannt. Ebenso werden die Hotpixel (als lokale Maxima erkennbar) größtenteils entfernt.....	26
Abbildung 19: Der Transit von WASP-52 b ist eindeutig erkennbar. Die Geraden wurden über einen Median der ersten, letzten und mittleren Flusswerte gebildet.....	27
Abbildung 20: Master Bias mit den deutlich „helleren“ Auslesekannten.	28
Abbildung 21: Die Abweichungen entstehen dann, wenn der Stern an den Bildrand kommt. Nachdem die Position korrigiert wurde, stehen die Werte wieder fast im Verhältnis 1:1.	28
Abbildung 22: Master-Bias und Median Reduktion.....	29
Abbildung 23: Die Peaks, wenn der Bildausschnitt zurück verschoben wird, sind noch immer erkennbar. Teilweise ergibt sich ein Unterschied zur Standardreduktion von 2 bis 3%.	29
Abbildung 24: Der Unterschied zwischen einem Master-Dark aus 10 Dark-Frames und einem aus nur einem Dark-Frame (reduzierter Bildbereich) liegt bei maximal 0.6 %. Je mehr Darks verwendet werden, desto näher liegt es am vollen Master-Dark.....	30
Abbildung 25: Darstellung von WASP-52 und 2 Aperturen, mit 4 und 8 Pixel Radius um das von der "DAOFIND" gefundene Zentrum. Diese Bereiche werden zur Photometrie verwendet.....	33
Abbildung 26: HAT-P 19 und Kalibrationssterne, welche aufgrund ihrer ähnlichen Helligkeit zu HAT-P 19 gewählt wurden.....	35
Abbildung 27: Lichtkurve von HAT-P 19 per Standardreduktion. Die Dauer des Transits ist ca. 180 Minuten – dies entspricht auch sehr gut den Daten aus der ETD.	35
Abbildung 28: Positionen des Targets und der Kalibrator Sterne.	38
Abbildung 29: Lichtkurve von TrES-5. Trotz der geringen Helligkeit von über 13 mag ist der Transit erkennbar.....	38
Abbildung 30: Fluss von KELT-16. Im ersten Drittel wurde nur Hintergrund gemessen, weil der Stern zu unscharf war.....	40

Abbildung 31: Lichtkurve von KELT-16.....	41
Abbildung 32: TrES-2, bereits durch ein Master-Bias reduziert.	42
Abbildung 33: Lichtkurve von TrES-2. Die horizontale graue Linie ist das vorhergesagte Transitende um 20:25 UTC +2.	43

12 Appendix

Die mit „Bool“ gekennzeichnete Optionen in der Spalte „Werte“ bedeuten, bei „0“ wird die Funktion nicht ausgeführt; bei „1“ wird die Funktion ausgeführt. Ansonsten gelten die Werte immer respektive der Erklärungsreihenfolge.

<i>Name</i>	<i>Erklärung</i>	<i>Werte</i>
<i>combo_master_dark</i>	Die Darks-Frames werden über Durchschnitt oder Median kombiniert	1, 2
<i>combo_master_bias</i>	Die Bias-Frames werden über Durchschnitt oder Median kombiniert	1, 2
<i>median_cut</i>	Die Pixelwerte im reduzierten Bild werden über einen Median Filter subtrahiert. Es kann maximal 1 Cut ausgewählt werden.	Bool
<i>average_cut</i>	Die Pixelwerte im reduzierten Bild werden über einen Durchschnitts-Filter subtrahiert. Es kann maximal 1 Cut ausgewählt werden.	Bool
<i>min_cut</i>	Die Pixelwerte im reduzierten Bild werden über einen Minimum-Filter subtrahiert. Es kann maximal 1 Cut ausgewählt werden.	Bool
<i>no_red</i>	Keine Master-Dark oder Bias Reduktion	Bool
<i>dark_bias_red</i>	Master-Dark und -Bias werden von Light-Frame subtrahiert	Bool
<i>dark_red</i>	Master-Dark wird von Light-Frame subtrahiert	Bool
<i>bias_red</i>	Master-Bias wird von Light-Frame subtrahiert	Bool
<i>bias_sigma</i>	Master-Bias und ein Sigma Clip werden vom Light Frame subtrahiert	[Bool, Sigma, Iterationen]
<i>bias_min</i>	Master-Bias und das Pixelwert-Minimum werden subtrahiert	Bool

<i>sigma_red</i>	Sigmaclip wird am Light-Frame durchgeführt	[Bool, Sigma, Iterationen]
<i>aperture</i>	Radius der Apertur für Photometrie	Pixel
<i>annulus</i>	Radius des Annulus für Photometrie	[Pixel innen, Pixel außen]