



Titel **Photometrische Analyse der Lichtkurve des Sterns HAT-P-5 mit Exoplaneten-Transit**

Autor Denis Nordmann

Version 21. August 2015, 04:42

Zitierung D. Nordmann. *Photometrische Analyse der Lichtkurve des Sterns HAT-P-5 mit Exoplaneten-Transit*. URL: <http://physik.co-i60.com> (abgerufen am: <Datum>)

Copyright  Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	2
2.1	Extrasolare Planeten	2
2.2	Der Exoplanet HAT-P-5 b	3
2.3	Nachweismethoden	3
2.3.1	Transitmethode	4
2.3.2	Radialgeschwindigkeitsmethode	4
2.3.3	Astrometrische Methoden	5
3	Experimenteller Aufbau	6
3.1	Das Teleskop	6
3.2	Die CCD-Kamera	6
3.3	Verwendete Hardware und Software	7
3.4	Photometrie	8
3.4.1	Kalibriermethoden	9
3.4.2	Aperturphotometrie	10
3.4.3	Differentielle Photometrie	11
4	Datenanalyse	13
4.1	Versuchsparameter	13
4.2	Auswahl der geeigneten Lichtkurve	13
4.2.1	Auswertung des Egress	19
4.2.2	Auftretender Offset in den Lichtkurven	21
4.3	Fitten der Daten mit dem ETD-Modell	22
4.3.1	Vorgehensweise bei der Ermittlung der Transitparameter	23
4.3.2	Ergebnisse der ETD-Fits	25
5	Ergebnisse und Fazit	29

1 Einleitung

Als Exoplaneten werden Planeten bezeichnet, die einen Stern außerhalb unseres Sonnensystems umkreisen. Die Detektion solcher Planeten(-systeme) war bis vor etwa 20 Jahren nicht möglich, da die Instrumente nicht die notwendige Messgenauigkeit besaßen.

Erst in den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts war die Technologie so weit entwickelt (Teleskope, Sensoren, Rechenmaschinen), dass allmählich erste Planeten außerhalb des Sonnensystems indirekt nachgewiesen werden konnten. Heute (Stand: 9. Juli 2013) wurden bereits 908 Exoplaneten bestätigt [1]. Hierbei handelt es sich größtenteils um jupiterähnliche Gasriesen, die ihren Stern mit einer Periodendauer von wenigen Tagen umkreisen. Solch ein Planet ist HAT-P-5 b im Sternbild Leier, dessen Transit im Sommer 2010 mit dem „Treburer-1 Meter-Teleskop“ am Michael-Adrian-Observatorium in Trebur beobachtet wurde. Durch photometrische Auswertung der ermittelten Lichtkurve konnten die Transitparameter bestimmt werden.

2 Grundlagen

2.1 Extrasolare Planeten

Die „erste“ Entdeckung eines extrasolaren Planeten (kurz: Exoplanet) gelang A. Wolszczan und D. A. Frail im Jahr 1992. Dabei wurden mehrere Himmelskörper entdeckt, die einen Pulsar (PSR 1257+12) umkreisen. Pulsare entstehen, wenn massereiche Sterne in einer Supernova explodieren – demnach handelt es sich bei diesen Exoplaneten vermutlich um Überreste von damals existierenden Planeten.

Im Jahr 1995 gelang den Schweizer Astronomen M. Mayor und D. Queloz die Entdeckung eines Exoplaneten, der um einen 50 Lichtjahre entfernten Hauptreihenstern namens 51 Pegasi kreist. Es handelt sich dabei um einen jupiterähnlichen Gasriesen von 0,46 Jupitermassen (M_J), welcher sich im Abstand von 0,05 Astronomischen Einheiten (AE) vom Stern befindet. Die Periodendauer von 51 Pegasi b beträgt nur 4,23 Tage. Der Nachweis des Exoplaneten war nur indirekt durch die Messung der Gravitationsstörung möglich, die von dem Planeten an seinem Stern verursacht wird [2, S.550ff].

Erste Entdeckungen von Exoplaneten waren zunächst nur in unmittelbarer Nachbarschaft unseres Sonnensystems möglich – also im Abstand von wenigen 10 bis 100 Lichtjahren. Es handelte sich dabei meist um Gasriesen mit einer Masse von bis zu 13 Jupitermassen. Ist der Abstand zum Stern sehr klein $R < 0,1$ AE, so lässt sich der Planet leicht nachweisen, da die Periodendauer nur wenige Tage bis Wochen beträgt. Die direkte Beobachtung eines Exoplaneten mit einem Teleskop ist äußerst schwierig, da der leuchtschwache Planet selbst wenig Licht reflektiert und von seinem Stern milliardenfach überleuchtet wird. Mit Hilfe von großen Teleskopen und digitalen Bildbearbeitungswerkzeugen ist es in bestimmten Fällen dennoch möglich, einen bzw. mehrere Exoplaneten visuell nachzuweisen [3].

Durch die stetige Verbesserung der Nachweismethoden ist es inzwischen möglich, auch „kleinere“ Planeten bzw. sogenannte Supererden ($M \leq 10 \cdot M_{\text{Erde}}$) zu detektieren. Dank spektroskopischer Verfahren kann sogar die Zusammensetzung der Atmosphäre des be-

trachteten Exoplaneten ermittelt werden.

Mit den heutigen Beobachtungsverfahren können wichtige Eigenschaften eines Exoplaneten wie z.B. Umlaufperiode, Bahnradius, Bahnform, Masse, Größe, Dichte und Zusammensetzung ermittelt werden. All diese Informationen werden zum besseren Verständnis über die Entstehung von Planetensystemen sowie zur Überprüfung unserer Theorien über die Entstehung des Sonnensystems herangezogen.

Auf der Suche nach Exoplaneten sind in den letzten Jahren Kandidaten [4, 5] entdeckt worden, die ihren Stern in der sogenannten „habitablen Zone“ umkreisen – also in jenem Abstand von dem Stern, in dem Wasser flüssig vorkommt bzw. günstige Bedingungen für die Entwicklung von Lebensformen herrschen.

2.2 Der Exoplanet HAT-P-5 b

Das Projekt HATnet (Hungarian Automated Telescope Network) ist ein Verband von sechs voll-automatisierten 11 cm-Teleskopen, die den Sternenhimmel nach Exoplaneten mittels der Transitmethode untersuchen [6]. Aktuell (Stand 10. Juli 2013) werden dem Projekt 29 Exoplaneten-Entdeckungen zugesprochen [1].

Der Exoplanet HAT-P-5 b kreist um den Stern HAT-P-5 (TYC 2634-1087-1 bzw. GSC 02634-01087). Der Stern befindet sich im Sternbild Leier und ist (340 ± 30) pc von unserem Sonnensystem entfernt. Die Masse des Sterns wurde mit $(1,163 \pm 0,065) M_{\text{Sonne}}$ bestimmt, der Radius beträgt $(1,137 \pm 0,007) R_{\text{Sonne}}$ und die scheinbare Helligkeit beträgt 11,96 mag (V-Filter). Die Position des Sterns am Himmel ist $RA_{2000} = 18^{\text{h}}17^{\text{m}}37,0^{\text{s}}$ und $DE_{2000} = +36^{\circ}37'18''$ [7].

Der Stern besitzt nur einen Planeten (Stand 10. Juli 2013), der im Jahr 2007 mittels der Transitmethode [8] entdeckt wurde. Der Planet umkreist den Stern im Abstand von $(0,04079 \pm 0,00076)$ AU mit einer Periodendauer von $(2,78849 \pm 0,000025)$ Tagen und besitzt eine Masse von $(1,06 \pm 0,11) M_{\text{J}}$. Es handelt sich dabei um einen heißen Jupiter, also einen Gasriesen mit hoher Oberflächentemperatur, bedingt durch den sehr geringen Abstand zum Stern [7].

2.3 Nachweismethoden

Es gibt unterschiedliche Nachweismethoden für Exoplaneten. Man unterteilt diese in direkte und indirekte Beobachtung.

Bei direkten Beobachtungen wird der Zentralstern fotografiert. Aufgrund von Beugungserscheinungen am Spiegelteleskop (Tubus und Halterungen des Sekundärspiegels) erscheint der Stern als Kreisscheibe, durchkreuzt von zwei senkrecht zueinander stehenden Strahlen (sogenannten Spikes). Die nähere Umgebung des Sterns kann somit aufgrund der Überblendung nicht beobachtet werden. Heutzutage ist es jedoch möglich mithilfe von bildgebenden Verfahren diese Störungen herauszurechnen und somit mögliche Trabanten visuell nachzuweisen.

Die indirekten Beobachtungen werden unterteilt in die Transit-, die Radialgeschwindigkeits- und astrometrische Methode.

2.3.1 Transitmethode

In unserem Sonnensystem lassen sich Planetentransits von der Erde aus an Merkur und Venus (Abb. 2) beobachten. Dabei bewegt sich der Planet vor die Sonnenscheibe und ist über die Transitedauer als schwarzer Kreis sichtbar, da man nur die Nachtseite des Planeten sieht. Die Phasen 1 und 2 in Abb. 1 bilden den sogenannten Ingress (Eingang), Phasen 3 und 4 den Egress (Ausgang).

Dieses Phänomen lässt sich auch bei weit entfernten Sternen beobachten. Dabei verläuft die Planetenbahnebene idealerweise genau in der Stern-Beobachter-Sichtlinie. Beim Eintritt in die Sichtlinie tritt ein messbarer Helligkeitsabfall des Sterns ein, nach dem Austritt hat der Stern wieder seine ursprüngliche Helligkeit (Abb. 1). Diese Methode hat sehr hohe Anforderungen an die Messinstrumente sowie Beobachtungsbedingungen, da die Helligkeitsschwankungen im Bereich von einigen wenigen Millimagnituden (mmag) stattfinden. Die Bestimmung der HAT-P-5 b-Lichtkurve erfolgte mit dieser Nachweismethode.

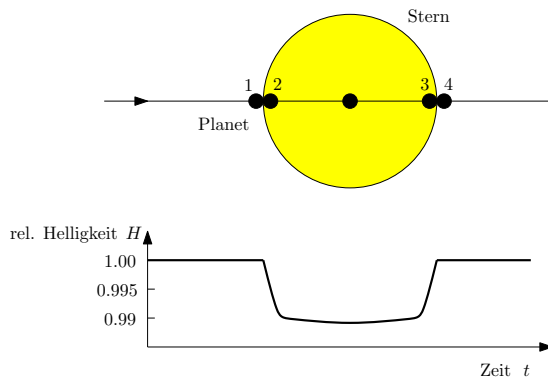


Abbildung 1: Oben: Schematische Darstellung eines Transits, Unten: Lichtkurve als zeitlicher Verlauf der relativen Helligkeit H [2, S.561].

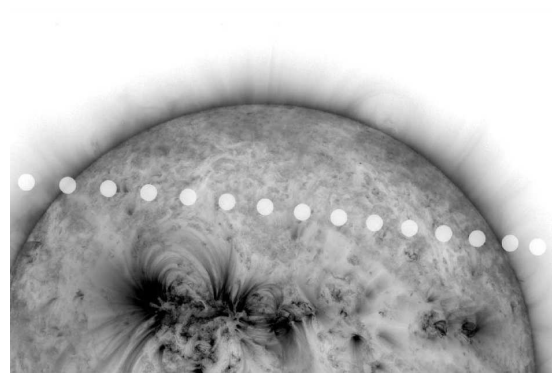


Abbildung 2: Venustransit vom 5. Juni 2012. Der Transit ist in einer Sequenz von mehreren Aufnahmen dargestellt. Bild: NASA/SDO, AIA

2.3.2 Radialgeschwindigkeitsmethode

Der Stern und Planet umkreisen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Dabei vollführt der Stern aus der Sicht des Beobachters eine periodische Bewegung, die in radialer Richtung aufgrund der Rot- und Blauverschiebung messbar ist. Mit dieser Methode wurden bis heute die meisten Exoplaneten detektiert.

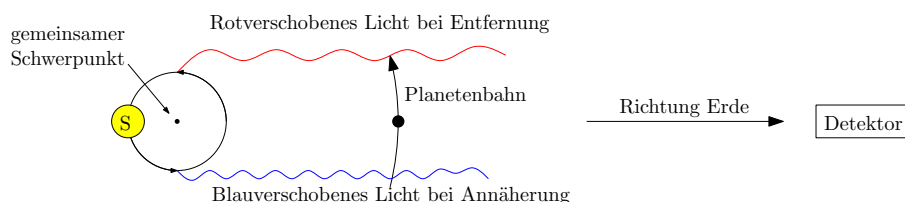


Abbildung 3: Schematische Darstellung zum Doppler-Verfahren [2, S.556].

Anhand der Daten aus solch einer Messung (Abb. 4) lassen sich zunächst ein bzw. mehrere Begleiter detektieren. Des Weiteren lässt sich die Umlaufzeit des Planeten anhand

der Periodendauer und anhand der Geschwindigkeitsänderung die Masse des Planeten bestimmen.

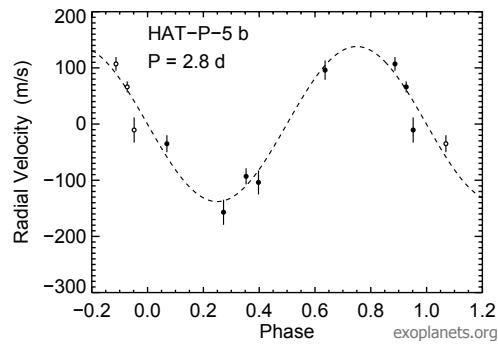


Abbildung 4: Ergebnis einer Radialgeschwindigkeitsmessung von HAT-P-5 b [9].

2.3.3 Astrometrische Methoden

Hierbei gilt das gleiche Prinzip wie bei der Radialgeschwindigkeitsmethode. Allerdings wird es erst durch genau bekannte Position des Sterns relativ zu anderen Sternen am Himmel möglich, Abweichungen von dieser Position zu erfassen. Dies ist ebenfalls eine weit verbreitete Methode.

3 Experimenteller Aufbau

3.1 Das Teleskop

Das Treburer-1 Meter-Teleskop (T1T) ist ein Cassegrain-Reflektor mit einem Spiegeldurchmesser von 1200 mm und einer Brennweite von 9550 mm. Das Gesamtgewicht des Teleskops inklusive Tubus und Gabelmontierung beträgt ca. 6000 kg [10]. Damit Beobachtungen erschütterungsfrei durchgeführt werden können, ist der gesamte Aufbau auf einem Säulenfundament errichtet worden, welches vom umgebenden Gebäude bzw. der Kuppel entkoppelt ist. Die Nachführung des T1T muss während einer Beobachtung manuell korrigiert werden, um eine größtmögliche Positioniergenauigkeit auf dem CCD-Sensor zu erhalten. Hierzu wird ein Off-Axis-Guider (OAG) verwendet.



Abbildung 5: Das Treburer-1 Meter-Teleskop (T1T). Bild: Uli Hausser [11]

3.2 Die CCD-Kamera

Für die Aufnahmen wurde eine CCD-Kamera vom Typ SBIG STL-6303E verwendet. Aus dem Handbuch bzw. dem Datenblatt zur Kamera [12, S.73] lassen sich folgende Herstellerangaben entnehmen:

- CCD-Chip von Kodak (Typ KAF-6303/LE), die maximale Auflösung eines Frames beträgt 3072×2048 Pixel, Pixelgröße auf dem Sensor: $9 \mu\text{m}$

- Der Dunkelstrom beträgt $1 \frac{e^-}{s \cdot px}$ bei einer Temperatur von 273,15 K (0 °C)
- Quanteneffizienz $\approx 68 \%$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 575 \text{ nm}$
- Zum Auslesen steht ein 16 bit A/D-Wandler zur Verfügung. Die A/D-Verstärkung beträgt $2,3 \frac{e^-}{ADU}$
- Mögliche binning-Modi: 1×1 , 2×2 , $3 \times 3, \dots$ (abhängig von Steuersoftware für STL-6303E)
- Auslesedauer eines vollen Frames beträgt 14 s
- Thermoelektrische Kühlung bis zu 50 °C unterhalb der ambienten Temperatur, Temperaturregelung von $\pm 0,1 \text{ K}$
- Read-out-noise: $15,2 e^-$

Die CCD-Kamera war zum Zeitpunkt der Messung an einem OAG montiert, wobei der Leitstern mit einer gewöhnlichen USB-Webcam beobachtet wurde.

3.3 Verwendete Hardware und Software

Zur Steuerung des Teleskops gibt es eine eigens dafür entwickelte Software. Diese läuft auf einem separaten Rechner, der aus Gründen der Störanfälligkeit keine Internetverbindung besitzt. Die Kameras wurden mit der Software MaxIM DL v4 von Diffraction Limited¹ angesteuert bzw. ausgelesen. Die Frames liegen im FITS-Format vor (Flexible Image Transport System) und werden mit dem Programm MuniWin 2.0.8 ausgewertet – einer Windows-Portierung des Softwarepakets C-MUNIPACK². Die verwendeten Rechner sind gewöhnliche Intel/AMD-basierende PCs mit einem der Windows-Betriebssysteme (Windows XP bzw. Windows 7). Die notwendige Zeitsynchronisation auf dem Mess-PC erfolgte via DCF77-Funkmodul.

¹http://www.cyanogen.com/maxim_main.php

²<http://c-munipack.sourceforge.net>

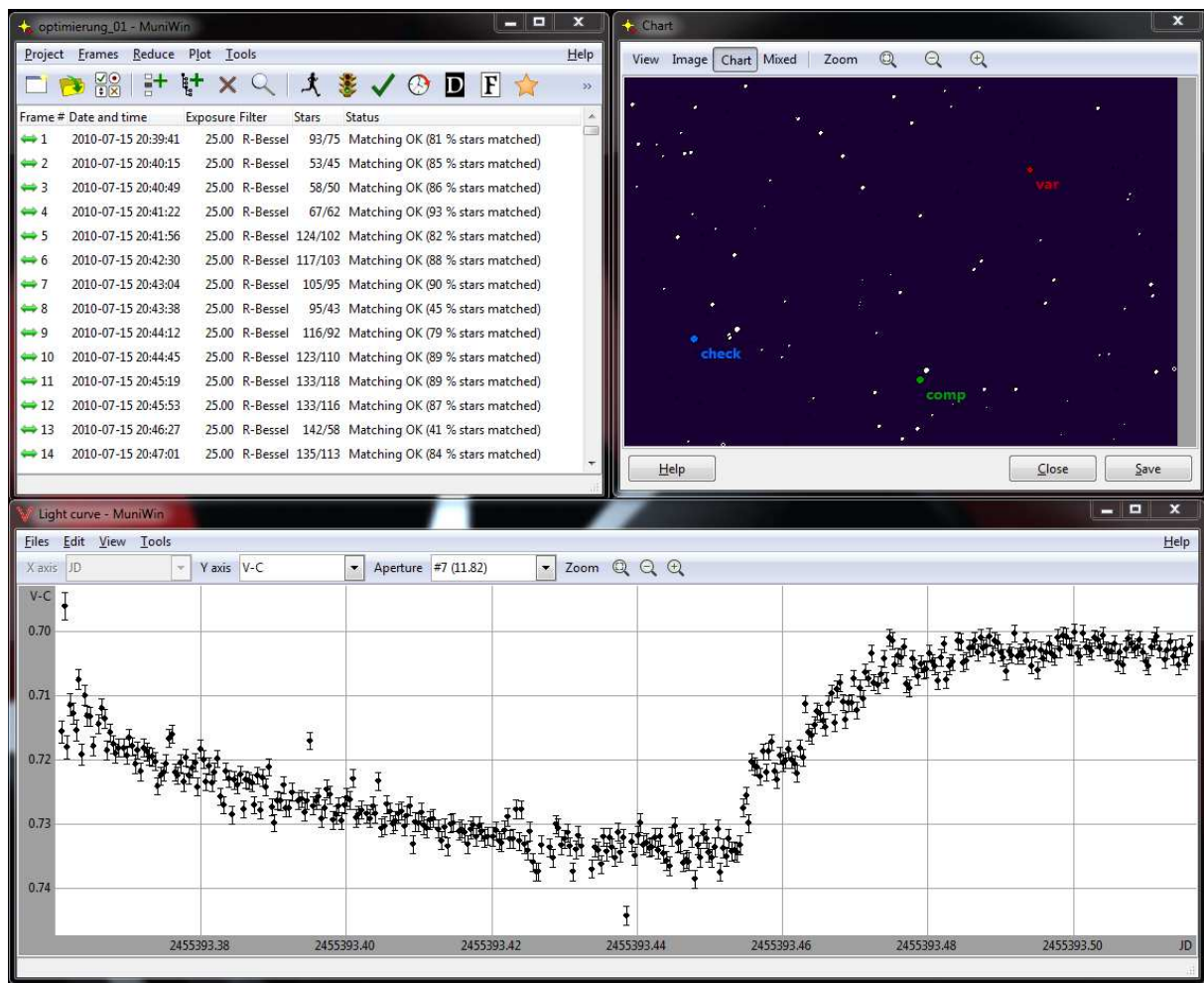


Abbildung 6: Benutzeroberfläche von MuniWin 2.0.8.

3.4 Photometrie

Photometrie ist ein Messverfahren, mit dem Änderungen der Helligkeiten bzw. Flussdichten des Lichtstroms oder Intensitäten von Himmelskörpern über eine gewisse Zeitspanne bestimmt werden können. Seit dem Einzug der CCD-Sensoren in der digitalen Fotografie ist es einfacher denn je, Photometrie zu betreiben – sowohl für Profi-Astronomen als auch für Amateure. Historisch bedingt werden die scheinbaren Helligkeiten m in sogenannten Magnituden (mag) angegeben. Dabei ist der Begriff der Magnitude der Vergleich von Helligkeiten zweier Sterne. Formal ist es definiert als der Logarithmus des Verhältnisses zweier Flussdichten F_1 und F_2 mit

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right).$$

Der Faktor 2,5 beruht auf der Definition des britischen Astronomen Norman Pogson (1829 – 1891), der beim Vergleich von Größenklassen aus älteren Messungen feststellte, dass Sterne der 1. Größe 100 mal heller sind als Sterne der 6. Größe. Also entspricht eine Magnitude einem Faktor von $\sqrt[5]{100} = 2,512$ im Helligkeitsunterschied.

Zum Vergleich: Das hellste Objekt am Himmel ist die Sonne mit $-26,8$ mag, gefolgt vom Mond ($-12,7$ mag). Sirius ist ein Stern der Größenklasse $-1,4$ mag. Unser Auge kann

unter Idealbedingungen Sterne der 4. bis hin zur 6. Größe wahrnehmen. Der Stern HAT-P-5 besitzt eine scheinbare Helligkeit von 11,96 mag (V-Filter). Großteleskope können lichtschwache Sterne im Bereich der 26. bis zur 30. Größe wahrnehmen (z. B. das Hubble Space Telescope), was in etwa der Helligkeit einer Kerze auf dem Mond entspricht, die das Teleskop aus dem erdnahen Orbit erfassen kann [13].

3.4.1 Kalibriermethoden

Bevor aus Einzelaufnahmen („Roh-Frames“) eine Lichtkurve erstellt werden kann, muss eine Kalibrierung vorgenommen werden. So besitzt die Kamera beispielsweise ein temperaturabhängiges Bildrauschen, defekte Pixel, Schmutzpartikel auf dem Spiegel/Filter/CCD-Sensor und es wird gelegentlich kosmische Strahlung detektiert oder es treten sonstige systematische Störgrößen auf. Diese müssen aus den Aufnahmen entfernt werden, damit die Messung akkurat wird. Für eine Kalibrierung werden neben den Rohbildern sogenannte Flat- und Dark-Frames benötigt. Die genaue Kalibrierprozedur erfolgt nach dem folgenden Schema:

- Dark-Korrektur

Die Dark-Korrektur ist notwendig, da der CCD-Chip einen temperaturabhängigen Dunkelstrom (dark current) verursacht. Bei sehr langen Belichtungsdauern kann sich dieser Effekt in Form von Rauschen und „heißen Pixeln“ (hot pixel) bemerkbar machen. Für die Dark-Korrektur werden mehrere Aufnahmen bei geschlossenem Shutter aufgenommen. Es ist wichtig, dass die Belichtungsdauer der Dark-Frames sowie die Sensor-Temperatur gleich groß ist wie bei aufgenommenen Rohbildern selbst. Man bildet ein Medianbild MD (sogenanntes Master-Dark) und subtrahiert dessen Pixelwerte von den Pixelwerten der erzeugten Rohbilder. Dies lässt sich wie folgend ausdrücken:

$$MD = \text{median}(Dark_1, Dark_2, Dark_3, \dots, Dark_n)$$

$$DC = Roh - MD,$$

wobei DC nun das Dark-korrigierte Rohbild ist. Im nächsten Schritt wird eine Flat-Korrektur durchgeführt.

- Flat-Korrektur

Die Flat-Korrektur ist notwendig, um auftretende Helligkeitsunterschiede, die von dem optischen System (Teleskop, Kamera, Filter) ausgehen, zu korrigieren.

Hierbei werden zunächst mehrere Aufnahmen von einer gleichmäßig ausgeleuchteten Fläche (z.B. einem Schirm oder dem Himmel bei Dämmerung) erstellt. Typischerweise sind Flat-Aufnahmen nicht „eben“ sondern inhomogen. Diese Inhomogenität wirkt sich multiplikativ auf die Pixelwerte aus, drum müssen alle DC -Bilder durch ein auf den Wert 1 normalisiertes Master-Flat dividiert werden.

Ein normalisiertes Master-Flat MF erhält man, indem ein Flat-Frame F durch ein Median-Flat $\tilde{F}$ dividiert wird. Die bereits Dark-korrigierten Aufnahmen DC werden nun durch das Master-Flat dividiert und man erhält nun ein kalibriertes Bild CAL . Die entsprechenden Gleichungen sind:

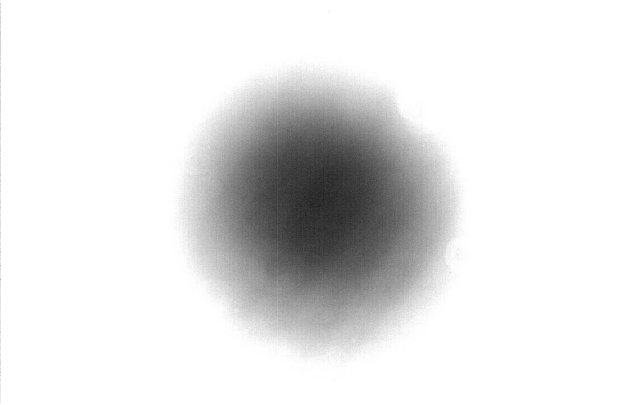
$$MF = \frac{F}{\text{median}(Flat_1, Flat_2, Flat_3, \dots, Flat_m)} \quad (\text{Normalisierung})$$

$$CAL = \frac{DC}{MF} = DC \cdot \frac{\tilde{F}}{F}.$$

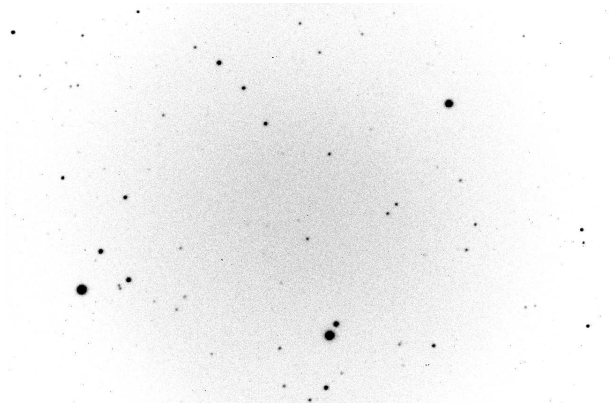
Eine ausführliche Beschreibung dieser und anderer Kalibriermethoden findet man in [14] und in der Dokumentation von MUNIPACK [15].



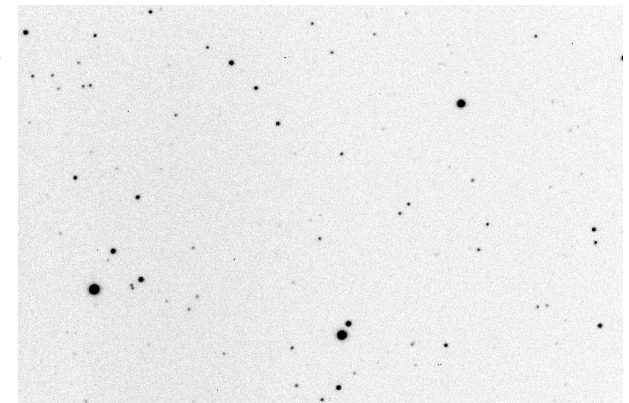
(a) Ein Master-Dark-Frame aus 20 Einzelaufnahmen. Im linken Teil des Bildes ist Bildrauschen sichtbar, verursacht durch Bias. Das Bias zeigt das elektronische Rauschen (read out noise) der Kamera.



(b) Master-Flat aus insgesamt 40 Einzelaufnahmen. Es sind ringförmige Helligkeitsunterschiede sichtbar, die von Staubpartikeln auf Filter direkt vor dem CCD-Chip verursacht werden.



(c) Beispiel eines Rohbilds. Sichtbar sind die Helligkeitsunterschiede in der Bildmitte zum Bildrand.



(d) Kalibriertes Rohbild nach der Dark/Flat-Korrektur.

Abbildung 7: Beispielbilder zum Kalibrierprozess aus Abschnitt 3.4.1. Aufnahmen wurden zur besseren Darstellung invertiert.

3.4.2 Aperturphotometrie

Wie bereits angedeutet, lässt sich die Helligkeit eines Himmelsobjekts mittels Photometrie bestimmen. Zunächst muss man Störungen im Bild durch eine Kalibrierung eliminieren. Nach der Kalibrierung besteht das Bild idealerweise aus zwei Komponenten: den Signalen, die von den Sternen ausgehen und dem Hintergrund. Um die Helligkeit eines Sterns bestimmen zu können, muss man diese miteinander vergleichen.

Man benutzt hierzu zwei Aperturen: die innere Apertur (kreisförmig) dient zur Erfassung der Intensität des Sterns. Der Bereich zwischen der Apertur und dem inneren Annulus in radialer Richtung wird ignoriert, d. h. es wird nicht in der Messung berücksichtigt. Der ringförmige Bereich zwischen dem inneren und äußeren Annulus dient zur

Ermittlung der Intensität des Hintergrunds. Der gemessene Hintergrund wird vom Stern subtrahiert und in eine rohe instrumentelle Magnitude umgerechnet. Diese kann anschließend in die scheinbare Magnitude umgerechnet werden.

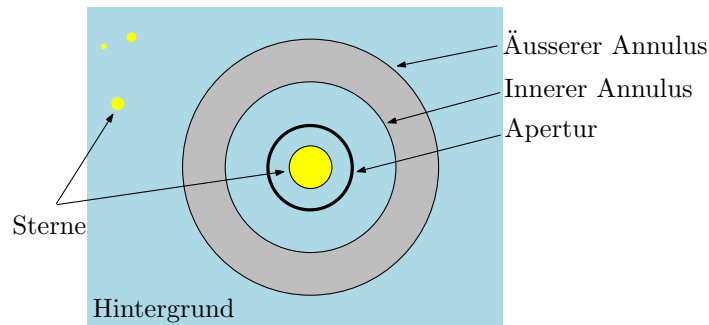


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Aperturphotometrie [14, S.273].

Das Programm MuniWin besitzt spezielle Algorithmen, die die Positionen der Sterne lokalisieren und verschiedene Radien der Aperturen und Annuli zur Verfügung stellen. Welchen Radius man wählt, ist von den statistischen Unsicherheiten abhängig. Diese sollen in jedem Fall minimal sein.

3.4.3 Differentielle Photometrie

Mittels der differentiellen Photometrie vergleicht man die Helligkeiten von bekannten Sternen mit einem variablen Stern. Hierzu wird der Stern, bei dem sich die Helligkeit mit der Zeit ändert, als „variable“ (V) deklariert. Die Helligkeit dieses Sterns wird mit einem „comparison“ (C) verglichen. Es gibt die Möglichkeit, mehrere comparison-Sterne zu einem „artificial star“ (künstlicher Stern) zu kombinieren. Dies macht man, um eine bessere Statistik zu erhalten. Für die Auswertung der Lichtkurve wird die Differenz $V - C$ gebildet. Der comparison-Stern kann ebenfalls mit einem „check“, (K) Stern verglichen werden. Idealerweise sollte die Differenz $C - K$ zeitlich konstant sein. Falls eine Drift entsteht, so ist der K - bzw. C -Stern für die anschließende Auswertung ungeeignet. Nach Möglichkeit sollten die C -Sterne eine ähnliche Magnitude haben wie der variable-Stern (V) und auf dem Frame nicht zu weit voneinander entfernt sein wie in Abb. 9 dargestellt [14, S.271ff].

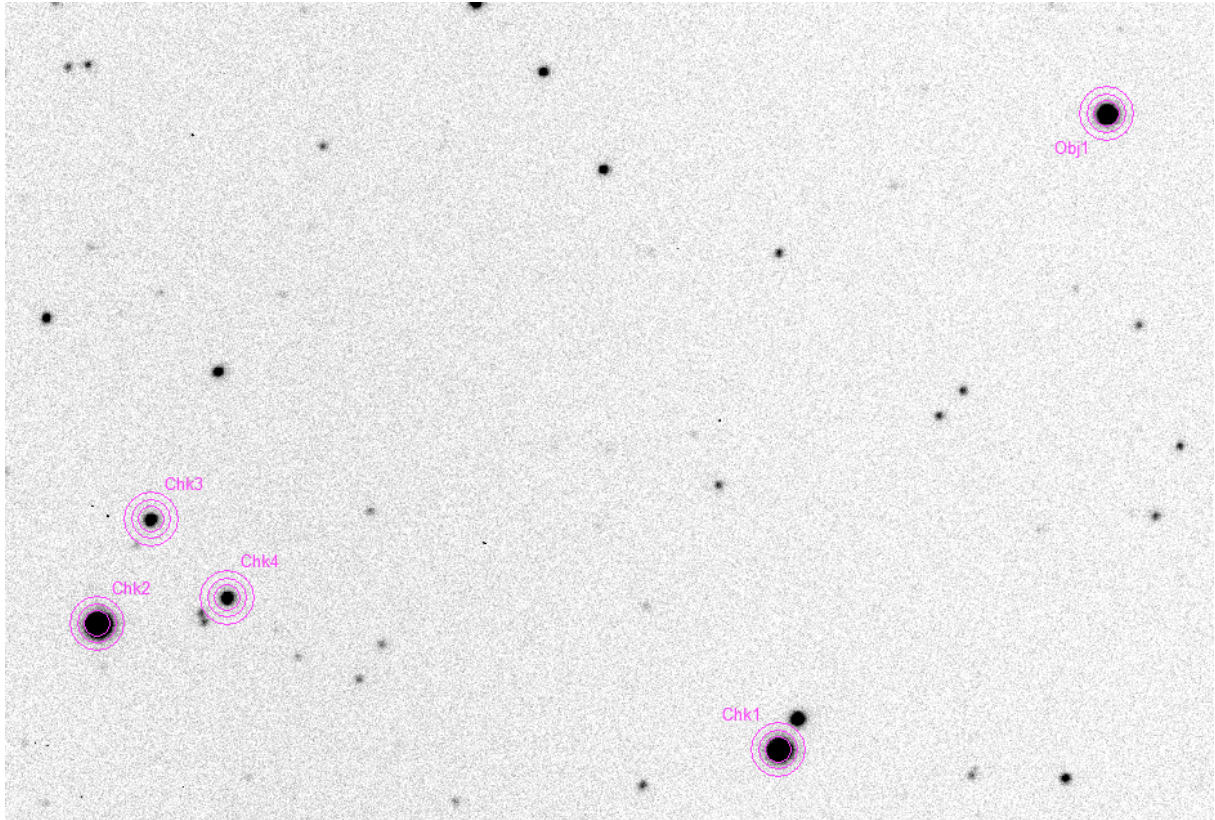


Abbildung 9: Beispiel aus der differentiellen Photometrie. Der Stern mit der Kennzeichnung „Obj1“ ist variabel (V) und soll untersucht werden. Die „Chk1“ bis „Chk4“-Sterne sind die Vergleichsterne (C), deren Helligkeit bekannt ist und sich über die Dauer der Messung nicht ändert. Bild aus MaxIM DL.

4 Datenanalyse

Die Beobachtung wurde am Abend des 15. Juli 2010 im Michael-Adrian-Observatorium in Trebur durchgeführt. Das Teleskop wurde von Prof. J. Ohlert bedient mit der Assistenz von D. Nordmann. Der Transitzeitpunkt von HAT-P-5 b war von der Exoplanet Transit Database [16] vorhergesagt worden, wobei der Transitbeginn um 20:32 UT und Transitende um 23:27 UT stattfinden sollten mit einer Gesamtdauer von 175 min. Die (bürgerliche) Dämmerung setzte um 19:31 UT ein, wobei die Phase vor dem Transitbeginn genutzt wurde, um die Instrumente vorzubereiten bzw. um Flat-Field-Aufnahmen zu erstellen. Der Himmel war zu dem Zeitpunkt des Sonnenuntergangs klar bzw. wolkenfrei und es herrschte eine Temperatur von etwa 22 °C, die während der Beobachtungsdauer auf etwa 16 °C gesunken ist.

4.1 Versuchsparameter

Es wurden insgesamt 420 „Light-Frames“ im FITS-Format mit einer Belichtungsdauer von jeweils 25 s aufgenommen. Von diesen 420 Aufnahmen waren 29 Frames von schlechter Qualität, da die Beobachtungsbedingungen noch nicht optimal waren (der Abendhimmel war noch zu „hell“ für die verwendete Belichtungszeit). Die Flat-Aufnahmen wurden in der Dämmerung aufgenommen und hatten eine Belichtungsdauer von jeweils 5 s. Während der sieben Minuten andauernden Flat-Aufnahmephase (Start um 20:01 UT, Ende um 20:08 UT) ist der maximale ADU-Wert eines Frames von Anfangs 56000 auf einen Wert von ca. 19000 abgefallen. Die Dark-Frames wurden erst gegen Ende der Beobachtung aufgenommen mit gleicher Beleuchtungsdauer wie die Light-Frames.

Die Betriebstemperatur des CCD-Sensors war auf -25 °C eingestellt. Die Frames wurden mit einer Auflösung von 1536×1024 Pixel bei einem binning-Faktor von 2×2 aufgenommen. Als Filter wurde ein R-Bessel verwendet. Es wurde darauf geachtet, dass während der Aufnahmen der Linearitätsbereich des CCD-Chips nicht verlassen wurde, was einem Pixelwert von etwa 60000 ADUs entspricht (Abb. 10). Das Teleskop war mit einer Brennweite jenseits von 9550 mm leicht defokussiert, das Gesichtsfeld beträgt 10×7 Bogenminuten. Das Teleskop wurde manuell nachgeführt. Ebenso wurde die temperaturabhängige Drift der Brennweite berücksichtigt, bedingt durch die Längenausdehnung des Tubus-/Stahlrahmens.

4.2 Auswahl der geeigneten Lichtkurve

391 Frames wurden zunächst in MuniWin eingelesen, Dark- und Flat-kalibriert und einem Photometrie-Algorithmus unterzogen. Im nächsten Bearbeitungsschritt wird von dem Programm ein sogenannter „cross-reference“-Frame verlangt. Hier soll ein Frame ausgewählt werden, in dem möglichst viele Sterne vom Suchalgorithmus ermittelt worden sind. Nach diesem Schritt wird die Auswertung von Lichtkurven möglich.

Für die Auswertung wurden größtenteils MuniWin-Werkseinstellungen (default settings) verwendet. Zwei Änderungen in den Einstellungen waren jedoch notwendig. Unter dem Menüpunkt **Project** $\rightarrow$ **Edit Properties** $\rightarrow$ **Star Detection** wurde die Einstellung **Gaussian Filter** auf **Filter Width (FWHM): 9,00 px** geändert (Werkseinstellung: 3,00 px). Damit wird eine verbesserte Detektion erreicht und gleichzeitig verhindert,

dass nur „echte“ Sterne und nicht irgendwelche Rauschstrukturen als Sterne erkannt werden.

Im Menüpunkt **Light Curve** wurde das Feld **Allow using an artificial comparison star** aktiviert. Damit kann z. B. ein künstlicher Stern aus mehreren Sternen erstellt werden. Sobald diese Einstellungen vorgenommen wurden, lässt man den Suchalgorithmus durchlaufen und das Programm kann bereits die Lichtkurven ausgeben.

Ziel ist es nun, geeignete Referenzsterne auszuwählen und die Messunsicherheiten anhand der Auswahl von geeigneten Aperturen/Referenzsterne zu minimieren. Hierzu werden im Menüpunkt **Plot** → **Light Curve** mehrere comp-Sterne und ein check-Stern ausgewählt. Im folgenden Menüpunkt bekommt man einen Plot der Standardabweichung gegen die Apertur. Es wird die Apertur im Minimum der Kurve ausgewählt (Abb. 13(a) bis 13(c)). Wichtig ist es, dass comp/check-Sterne, die miteinander verglichen werden, etwa die gleiche Helligkeit besitzen.

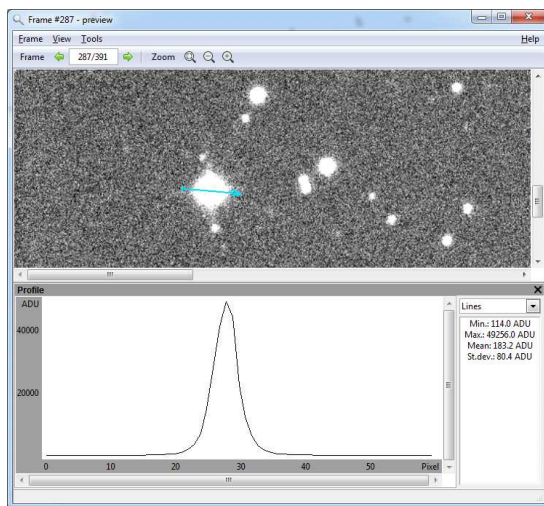


Abbildung 10: Zur Ermittlung der maximalen ADUs. Der hellste Stern wird einer Linienanalyse unterzogen. Der ADU-Wert sollte nicht den Bereich der Linearität verlassen. Grafik aus [17].

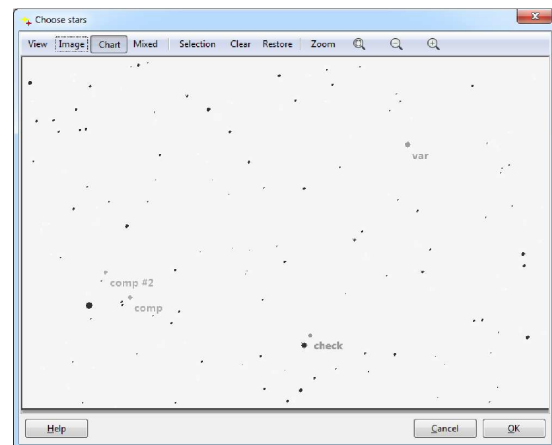


Abbildung 11: Beispiel für die Ermittlung der geeigneten Aperturen. Die comp- und check-Sterne besitzen eine möglichst ähnliche Magnitude. Grafik (invertiert) aus [17].

Eine Darstellung aller Comp-Sterne ist in Abb. 12 sichtbar.

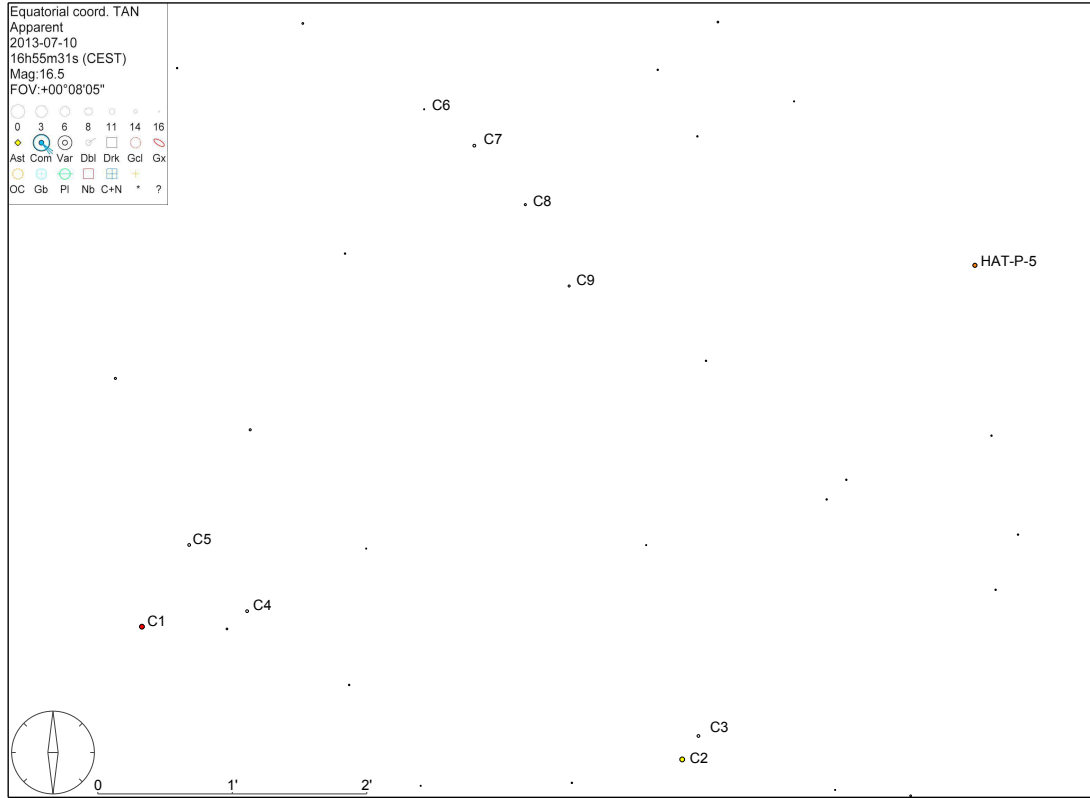
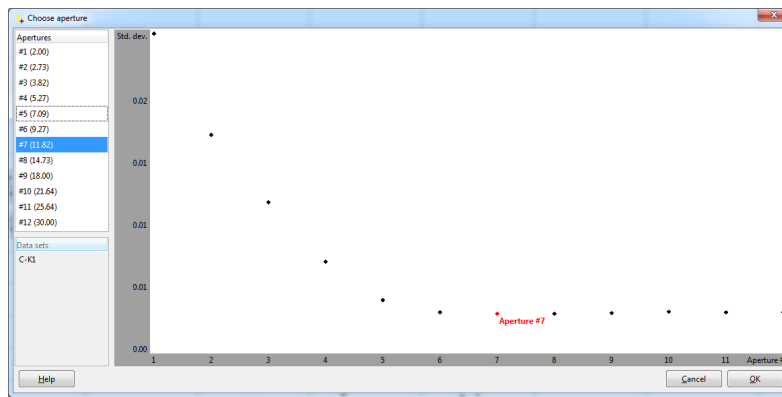


Abbildung 12: Auswahl der Vergleichssterne C1 bis C9. Grafik erstellt mit dem Programm „Cartes du Ciel“ [18], Katalogdaten entnommen aus [19].

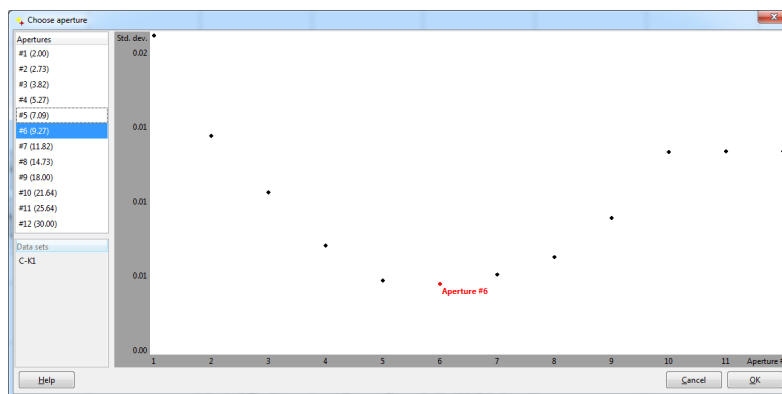
Die visuellen Helligkeiten und Positionen der Sterne sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Bezeichnung	Stern	RA_{2000}	DE_{2000}	Visuelle Helligkeit (mag)
HAT-P-5	UCAC4-634-057256	$18^h17^m37,327^s$	$+36^\circ37'17,17''$	12,06
C1	UCAC4-633-060760	$18^h18^m08,187^s$	$+36^\circ34'35,34''$	11,17
C2	UCAC4-633-060721	$18^h17^m48,161^s$	$+36^\circ33'36,60''$	11,26
C3	UCAC4-633-060720	$18^h17^m47,560^s$	$+36^\circ33'47,08''$	13,52
C4	UCAC4-633-060750	$18^h18^m04,292^s$	$+36^\circ34'42,33''$	13,93
C5	UCAC4-633-060755	$18^h18^m06,440^s$	$+36^\circ35'11,82''$	14,02
C6	UCAC4-634-057284	$18^h17^m57,774^s$	$+36^\circ38'26,70''$	16,11
C7	UCAC4-634-057282	$18^h17^m55,898^s$	$+36^\circ38'10,34''$	14,08
C8	UCAC4-634-057280	$18^h17^m53,999^s$	$+36^\circ37'44,12''$	15,00
C9	UCAC4-634-057278	$18^h17^m52,374^s$	$+36^\circ37'07,84''$	14,98

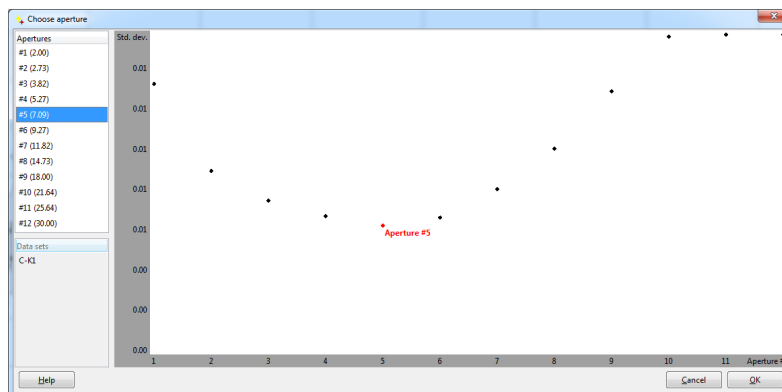
Tabelle 1: Übersicht der Kandidaten, Daten entnommen aus [19].



(a) Plot der Standardabweichung gegen Aperturradius für Sterne der 11. bis 12. Größe (C1 und C2). Das Minimum befindet sich bei der Apertur # 7 (11,82 px).



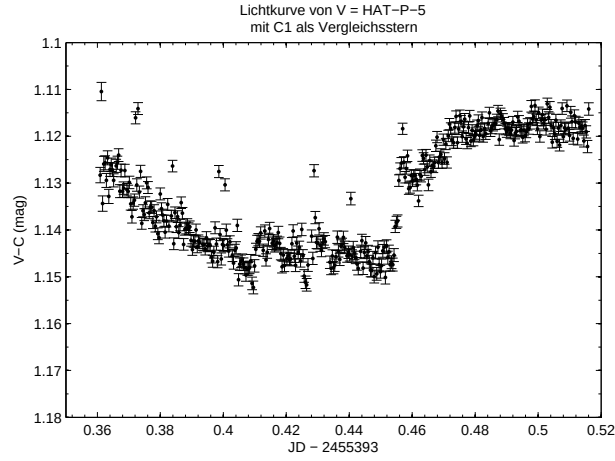
(b) Plot der Standardabweichung gegen Aperturradius für Sterne der 13. Größe (C3 bis C5). Hier liegt das Minimum der Kurve bei der Apertur # 6 (9,27 px).



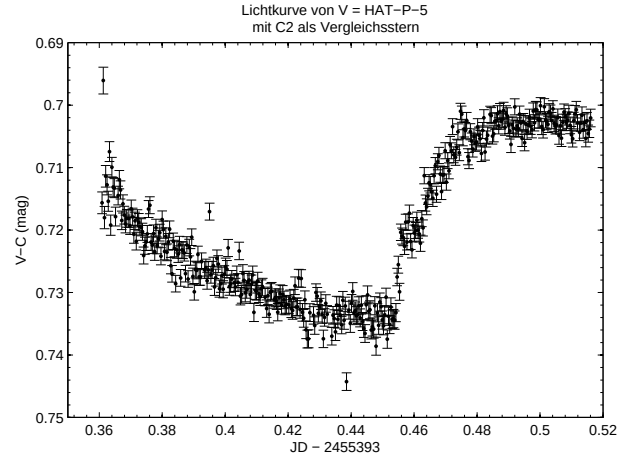
(c) Plot der Standardabweichung gegen Aperturradius für Sterne der 14. bis 16. Größe (C6 bis C9). Minimum bei # 5 (7,09 px).

Abbildung 13: Anhand der Auftragung der Standardabweichung gegen den Aperturradius lässt sich die optimale Apertur ermitteln. Grafiken erstellt mit MuniWin [17].

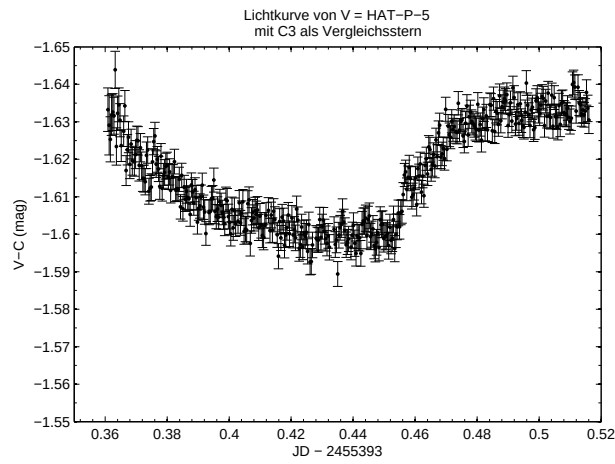
Nun werden Lichtkurven von verschiedenen Sternen miteinander verglichen. Eine optimale Lichtkurve ist in Abb. 1 dargestellt. Durch die Auswahl von verschiedenen Sternen sind die Messunsicherheiten größer oder kleiner bzw. die Messwerte streuen unterschiedlich stark. Die Streuung und die Messunsicherheiten sollen minimiert werden, in manchen Fällen müssen Kompromisse geschlossen werden.



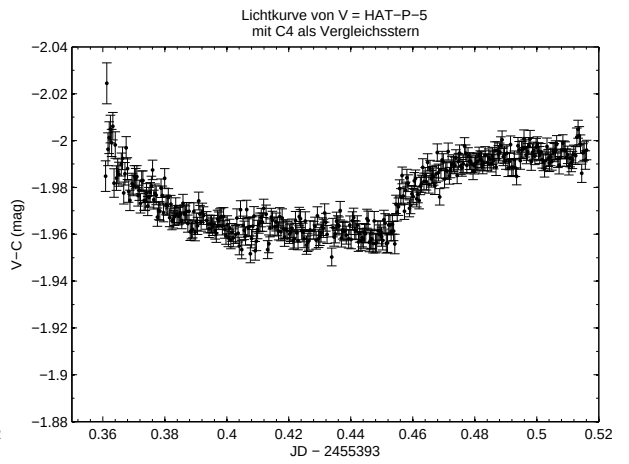
(a) C1 mit $11,17^m$



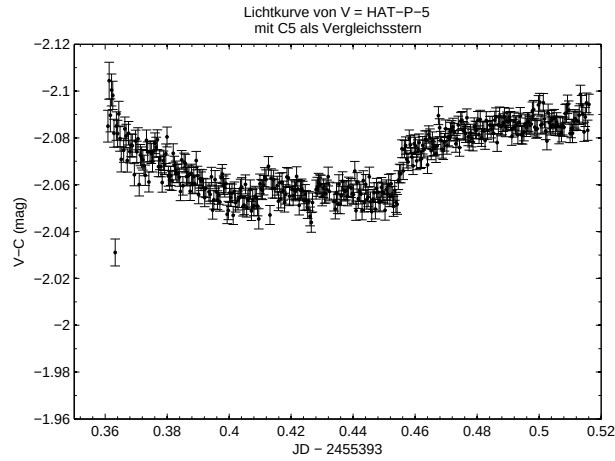
(b) C2 mit $11,26^m$



(c) C3 mit $13,52^m$

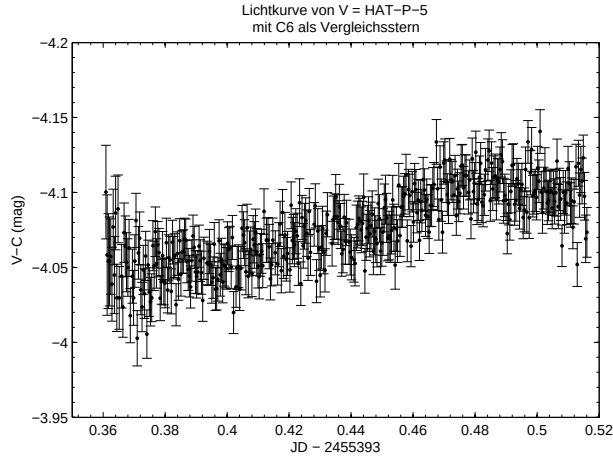


(d) C4 mit $13,93^m$

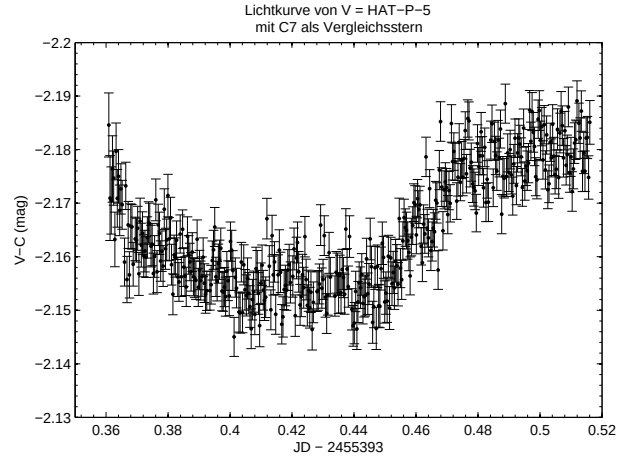


(e) C5 mit $14,02^m$

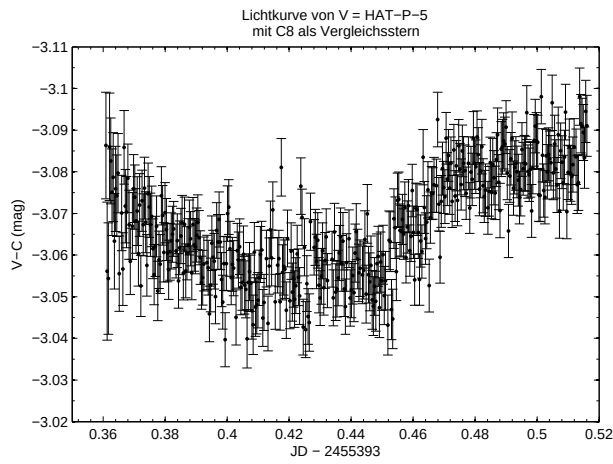
Abbildung 14: Die ersten Lichtkurven zeigen, dass kein eindeutiger Ingress wie in Abb. 1 sichtbar ist. Es gibt einen deutlich sichtbaren „Sprung“ bei $JD \approx 0,455$ – vermutlich handelt es sich hierbei um einen systematischen Fehler, der während der Messung aufgetreten ist. C1 und C2 sind die leuchtstärksten Sterne, C3 bis C5 sind 1 – 2 Magnituden schwächer.



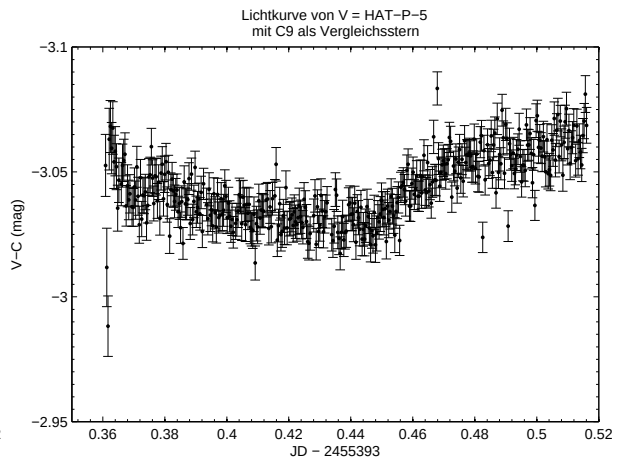
(a) C6 mit $16,11^m$



(b) C7 mit $14,08^m$



(c) C8 mit $15,00^m$



(d) C9 mit $14,98^m$

Abbildung 15: Leuchtschwache Sterne der 14. bis 16. Größe sind keine guten Vergleichssterne, sichtbar an der starken Streuung der Werte.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Kombinationen von C1 bis C9 zu einem künstlichen Stern zusammengefasst. Dadurch lassen sich in bestimmten Fällen unerwünschte Helligkeitsschwankungen kompensieren (Abb. 14(a)) bzw. Streuungen reduzieren.

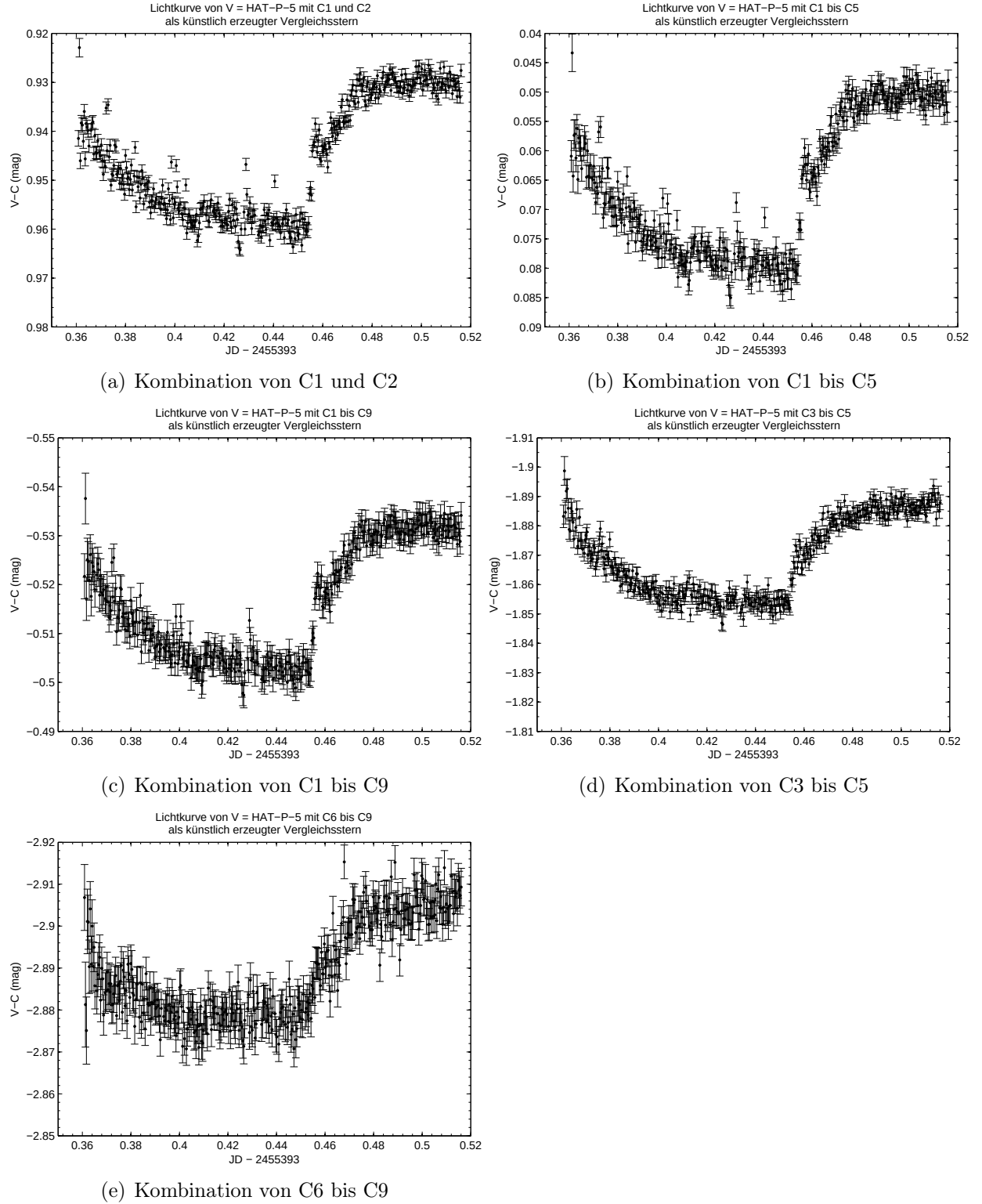


Abbildung 16: Mit künstlichen Sternen lassen sich die Ergebnisse sichtbar verbessern.

4.2.1 Auswertung des Egress

Im Idealfall besitzt die Lichtkurve einen Bereich, in dem die Helligkeit konstant bleibt. Dies ist z. B. in der Phase vor dem Ingress („Vorkurve“) bzw. nach dem Egress („Nachkurve“) der Fall (Abb. 17). Dieser Bereich kann nun zur Auswertung herangezogen werden, indem

man sich die Messunsicherheiten in diesem Bereich anschaut. Die Parameter der Kurve mit der kleinsten Streuung in diesem Bereich wird zum Fitten der Modelldaten verwendet.

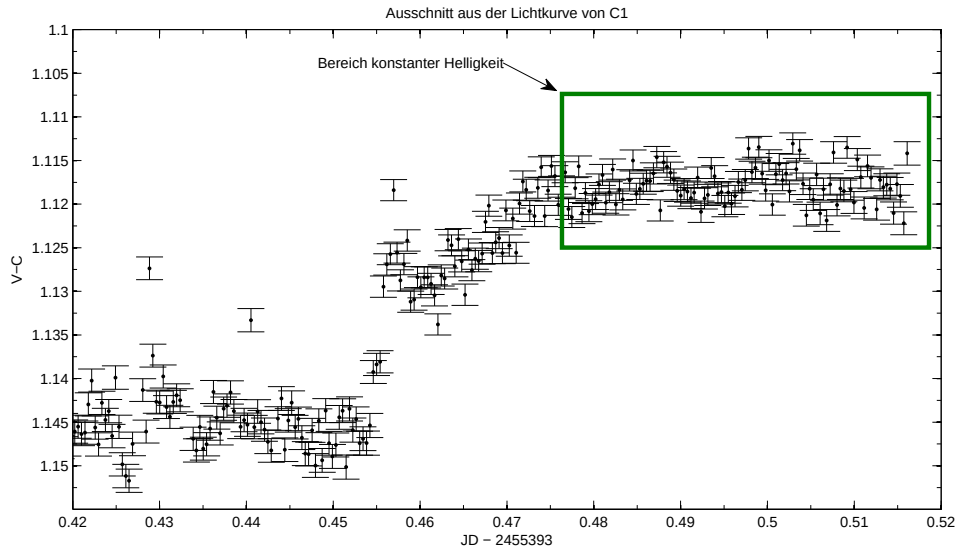


Abbildung 17: Anhand des gekennzeichneten Bereichs lässt sich z. B. die Streuung bestimmen.

Im folgenden Schritt werden Mittelwerte der Standardabweichungen der letzten 90 Frames berechnet und grafisch aufgetragen.

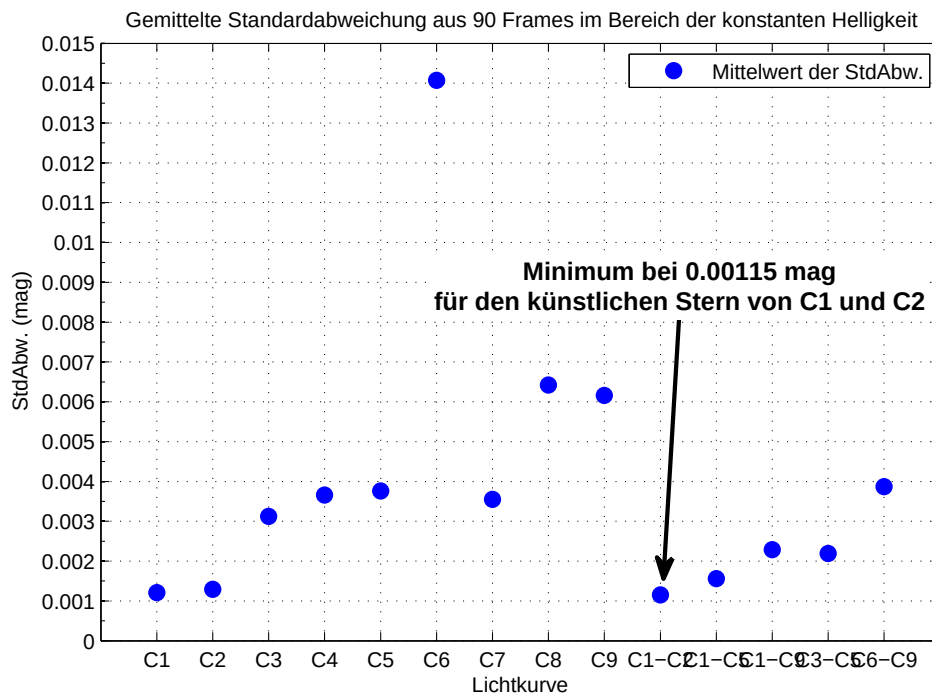


Abbildung 18: Anhand dieser Grafik lässt sich die Lichtkurve mit der minimalen Standardabweichung herausfinden.

Anhand des Vergleichs der ermittelten Streuungen in Abb. 18 ist sichtbar, dass die Lichtkurven von C1, C2 und dem künstlichen Stern aus C1 und C2 für die weitere Auswertung in Frage kommen. Die Unsicherheiten sind in diesem Fall beim künstlichen Stern

aus C1 und C2 (Abb. 16(a)) minimal. Die maximale Streuung hat man beim Vergleich von V mit C6 (Abb. 15(a)). Betrachtet man die jeweiligen Lichtkurven, so wird dies auf Grund der Streuung der Messdaten in Abb. 14 bis 16 ersichtlich.

4.2.2 Auftretender Offset in den Lichtkurven

Jede bisher ermittelte Lichtkurve besitzt einen merklichen „Sprung“ bei $JD \approx 0,455$. Die Ursachen für diesen Offset sind nicht vollständig geklärt. Es wird jedoch vermutet, dass dieser Offset durch eine Störung im elektrischen System der Kamera auftritt. Solche systematischen Fehler sind während einer Beobachtung extrem schwer zu erkennen. Eine gute Protokollführung ist die notwendige Voraussetzung, damit die Ursachen für solche Abweichungen ausfindig gemacht und bei zukünftigen Beobachtungen vermieden werden können.

Alle bisher ermittelten Lichtkurven enthalten also einen systematischen Fehler, dessen genaue Ursache unbekannt ist. Damit die Messung nicht ganz verworfen wird, muss die Lichtkurve einer sinnvoll gewählten Korrektur unterzogen werden. Anschließend erfolgt der Vergleich beider Lichtkurven mit und ohne Offset.

Wird nun in den letzten 159 der insgesamt 390 Frames ein Wert von 0,01406 mag subtrahiert, so erhält man eine Lichtkurve (vgl. Abb. 19), die eine Ähnlichkeit mit dem theoretischen Modell einer Transit-Lichtkurve aus Abb. 1 besitzt. Da der Ingress zum Zeitpunkt der Dämmerung stattfand, konnte keine eindeutige „Vorkurve“ ermittelt werden.

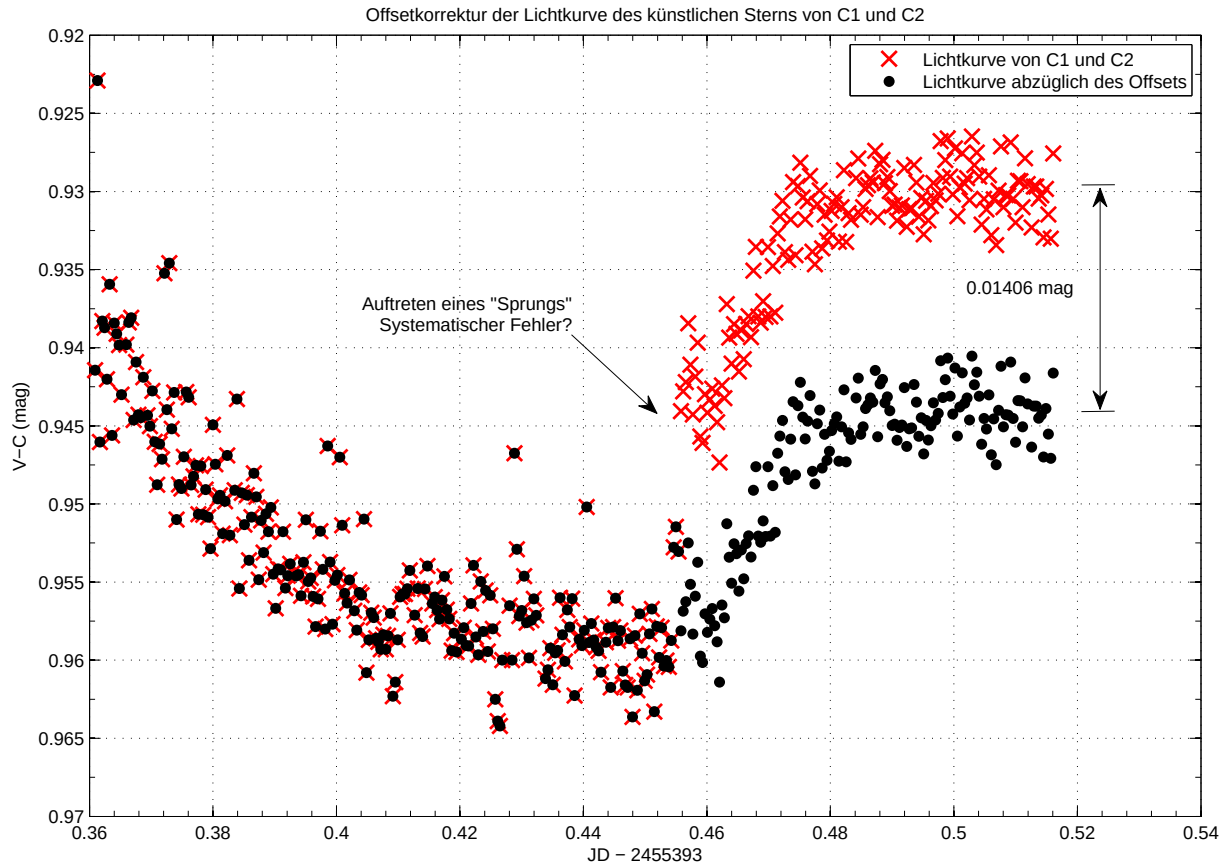


Abbildung 19: Der Offset (Sprung) als Resultat einer Änderung der Versuchsparameter während der Beobachtung? Im weiteren Verlauf der Analyse sollen beide Lichtkurven berücksichtigt werden, um das Ausmaß des systematischen Fehlers beziffern zu können.

4.3 Fitten der Daten mit dem ETD-Modell

Die Czech Astronomical Society [16] bietet mit ihrer Exoplanet Transit Database (ETD) sowohl Amateur- als auch Profiastronomen die Möglichkeit an, die Messergebnisse einer Beobachtung auf ihre Homepage hochzuladen und anhand eines Transitmodells automatisch auswerten zu lassen. Die Daten müssen lediglich im ASCII-Textformat vorliegen und die Spalten „JD“, „MAG“ und „ERROR“ durch Leer- oder Tabstoppzeichen voneinander getrennt sein. Die Ergebnisse können in einer Transit-Datenbank gespeichert und mit Ergebnissen aus vorangegangenen Transits verglichen werden.

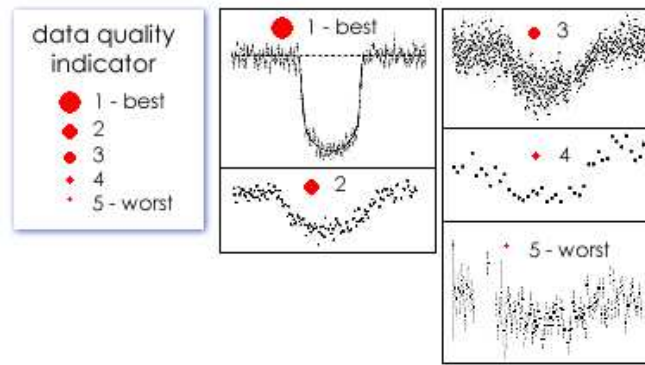


Abbildung 20: Qualitätsindikatoren für verschiedene Lichtkurventypen [16].

Im Folgenden werden die Daten zweier Lichtkurven aus Abschnitt 4.2.2 (Abb. 19) ausgewertet. Ziel dieser Auswertung ist es, die Transitparameter wie Transitmitte, Transitsdauer und Transittiefe zu ermitteln. Anschließend werden die gefundenen Transitparameter mit den bereits in der ETD vorhandenen verglichen und die Qualität der Messung beurteilt.

4.3.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Transitparameter

Auf der Homepage der ETD [20] sucht man zunächst nach dem Bereich „Model-fit your data“. Im nächsten Schritt wird im Pull-Down-Menü **Choose exoplanet** der Eintrag *HAT-P-5 b Lyr* ausgewählt und die entsprechende Datei (ASCII Textformat), die die Messwerte im vorgegebenen Format (JD, MAG, ERROR) enthält, hochgeladen (siehe Abb. 21).

ETD - Exoplanet Transit Database

[Observers community](#) |
 [How to contribute to ETD](#) |
 [Model-fit your data](#) |
 [Transit predictions](#) |
 [KEPLER Transit predictions](#) |
 [KEPLER Candidates](#) |
 [CoRoT Transit predictions](#) |
 [CoRoT Candidates](#)

step 1 / 5

INSTRUCTION: In the first step, just select an exoplanet and load data file with observation. Also select if data are in geocentric or heliocentric JD and specify, if brightness is given in MAG or FLUX. Both geocentric and heliocentric JD must be computed from COORDINATED UNIVERSAL TIME (UTC) with leap seconds included (common time in your PC / notebook).

Choose exoplanet HAT-P-5 b Lyr ▼

Data file with observation: lc12_etd.txt

Required 3 columns: JD, MAG, ERROR. Other columns are ignored. Columns must be separated by space or TAB.

JD format: ☒ geocentric ☐ heliocentric (both based on UTC)

Brightness column: ☒ in magnitudes ☐ in flux

Model light curve fitting procedure: O. Pejcha, 2008 (read [description](#)).
Database and web interface: L. Brat, 2008

Abbildung 21: Im ersten Schritt wählt man den gewünschten Exoplaneten aus und lädt die Messdaten als Textdatei hoch. Das „JD format“ und die „Brightness column“ werden entsprechend der Abbildung ausgewählt. Bild entnommen aus [20].

Das JD format wird als *geocentric* und **Brightness Column in magnitudes** gewählt. Im nächsten Menüpunkt sieht man die Vorschau der Lichtkurve und einige Parameter, die nicht verändert werden müssen. In der Zeile **systematic errors square power** wird ein Häkchen bei *Correction of systematic errors - parabolic fit* gesetzt (Abb. 22). Die Ergebnisse des Modell-Fits werden auf der nächsten Seite, nachdem man den Button **Compute >** betätigt hat, zusammengefasst.

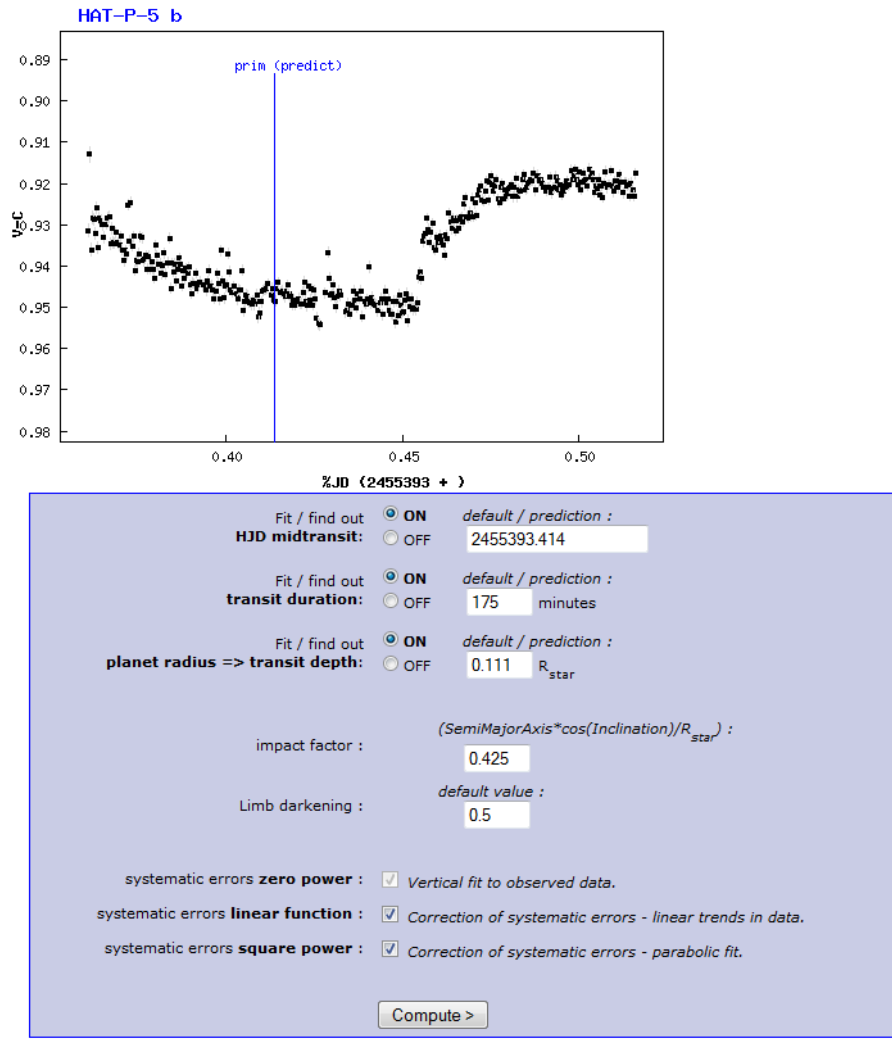
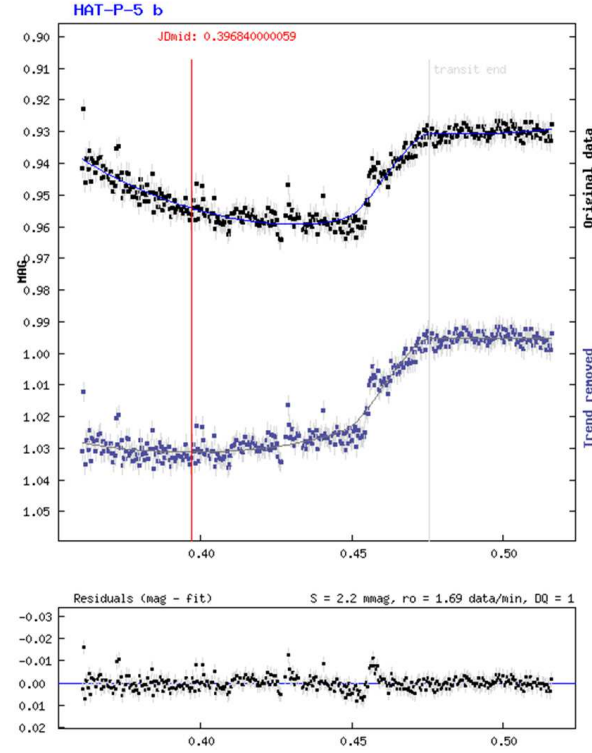


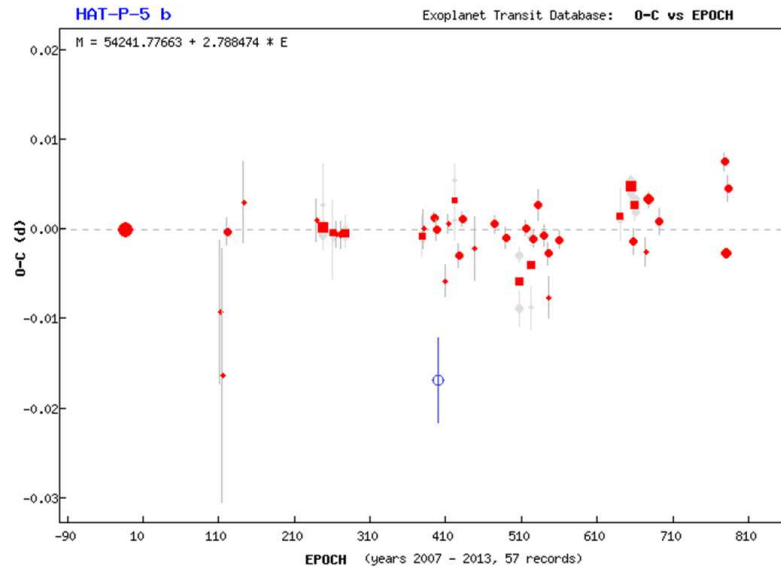
Abbildung 22: Im nächsten Schritt ist die Vorschau der Lichtkurve sichtbar sowie die Optionen für weitere Fitparameter. Mit einem Mausklick auf den Button „Compute“ startet die Auswertung. Bild entnommen aus [20].

Die ETD-Fits unserer Lichtkurven sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

4.3.2 Ergebnisse der ETD-Fits

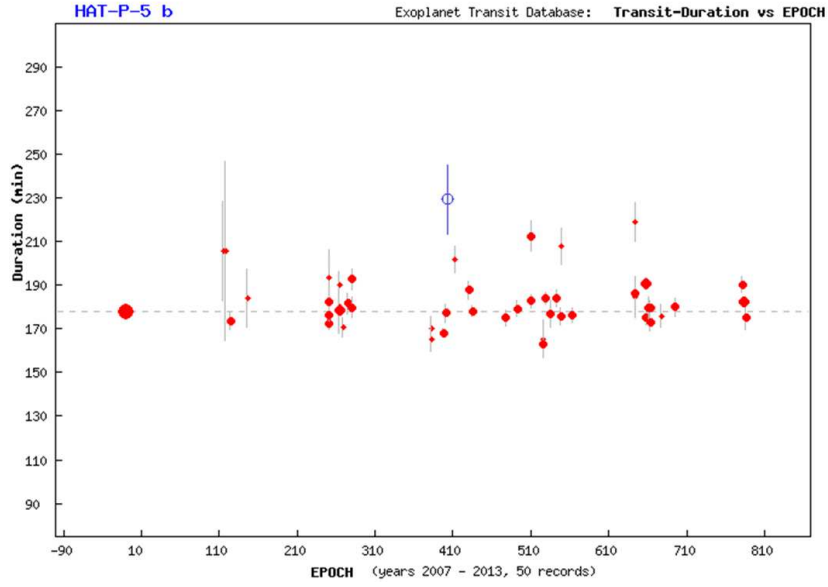


(a) Plot der Daten.

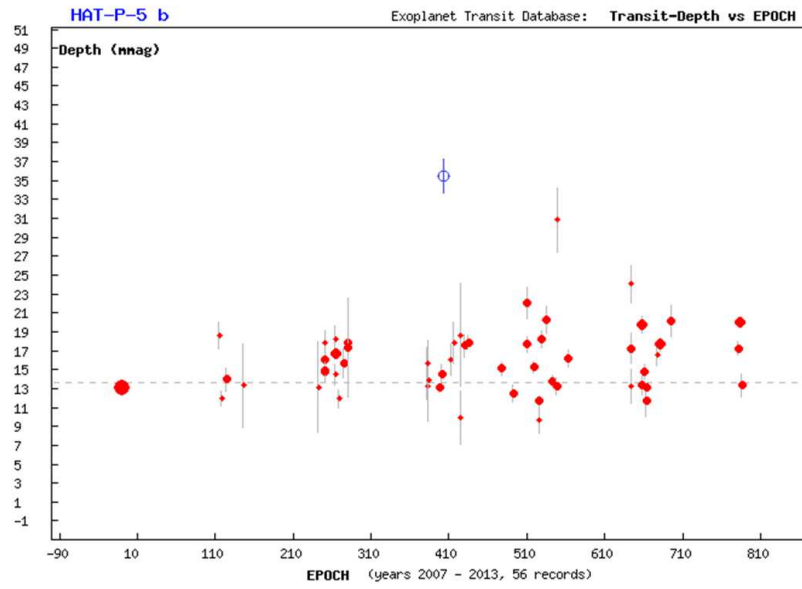


(b) Transitmitte.

Abbildung 23: ETD Fit-Ergebnisse der original-Lichtkurve. Die Messpunkte ohne Farbfüllung in Abb. 23(b) bis 24(b) sind mit T1T aufgenommene Daten. Die Größe eines Messpunkts ist ein Maß für die Qualität (vgl. Abb. 20).

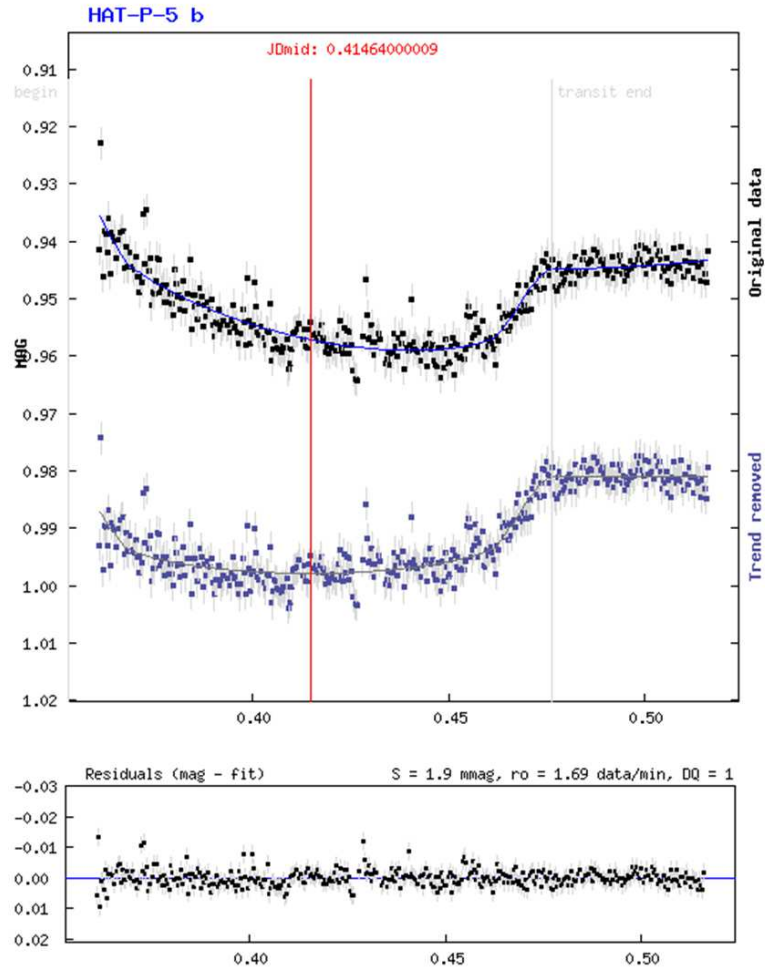


(a) Transiddauer.

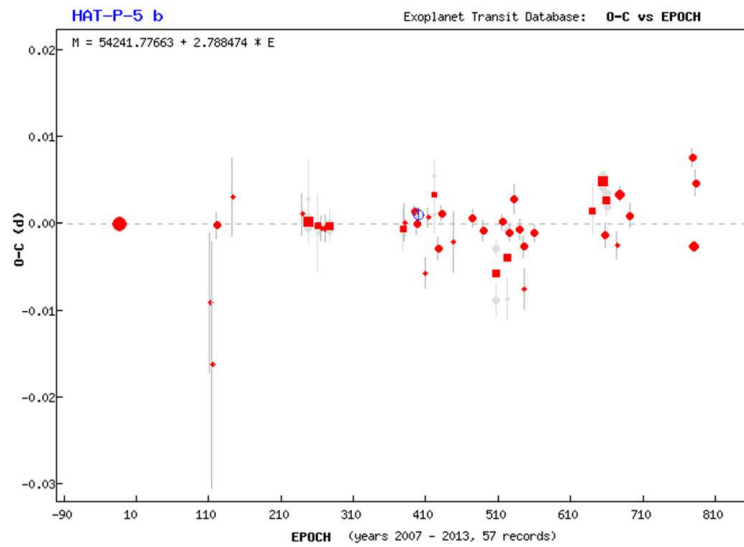


(b) Transittiefe.

Abbildung 24: ETD Fit-Ergebnisse der original-Lichtkurve. Die Messpunkte ohne Farbfüllung (blauer Kreisring) sind unsere Daten. Die Größe eines Messpunkts ist ein Maß für die Qualität (vgl. Abb. 20).

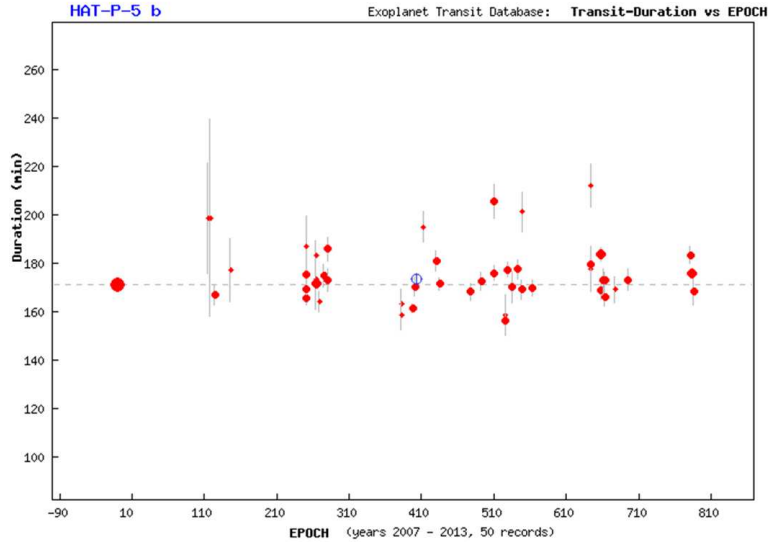


(a) Plot der Daten.

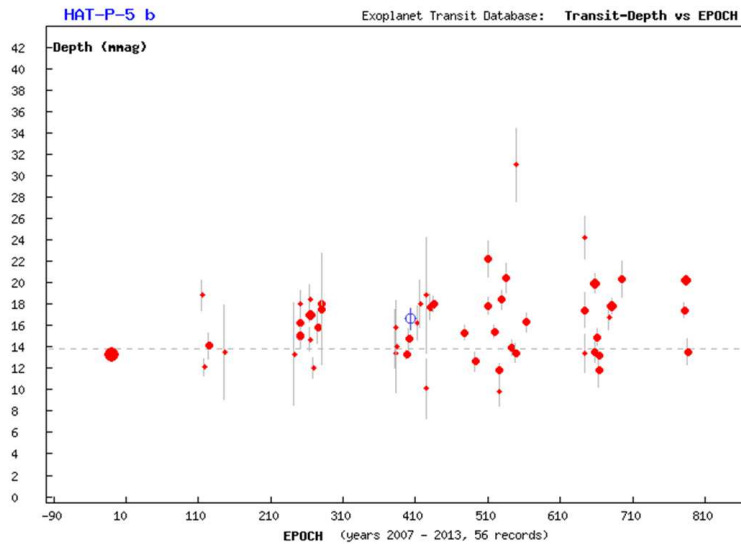


(b) Transitmitte.

Abbildung 25: ETD Fit-Ergebnisse der nach Abschnitt 4.2.2 korrigierten Lichtkurve. Unsere Messung ist in (b) als blauer Kreisring gekennzeichnet. Der Fehlerbalken befindet sich innerhalb des Kreisrings.



(a) Transiddauer.



(b) Transittiefe.

Abbildung 26: ETD Fit-Ergebnisse der nach Abschnitt 4.2.2 korrigierten Lichtkurve. Unsere Messungen sind als blaue Kreisringe gekennzeichnet.

ETD presentiert uns Ergebnisse in Form von fünf Grafiken und Transitparametern. Die Grafik in Abb. 23(a) zeigt einen Plot der Lichtkurve inklusive Trendkorrektur sowie die Residuen. In den darauffolgenden Grafiken werden die Fitparameter unserer Messung mit Fitparametern anderer Messungen verglichen. So wird in Abb. 23(b) der Vergleich $O - C$ (observed minus calculated), in Abb. 24(a) die Transiddauer und in Abb. 24(b) die Transittiefe dargestellt. Die Grafiken in Abb. 25 und 26 (a) bis (b) sind analog zu Abb. 23/24 erstellt worden, allerdings wurde hierbei eine Korrektur gemäß Abschnitt 4.2.2 auf die Lichtkurve angewandt. Eine Zusammenfassung der Transitparameter beider Lichtkurven ist in der Tabelle 2 aufgelistet.

5 Ergebnisse und Fazit

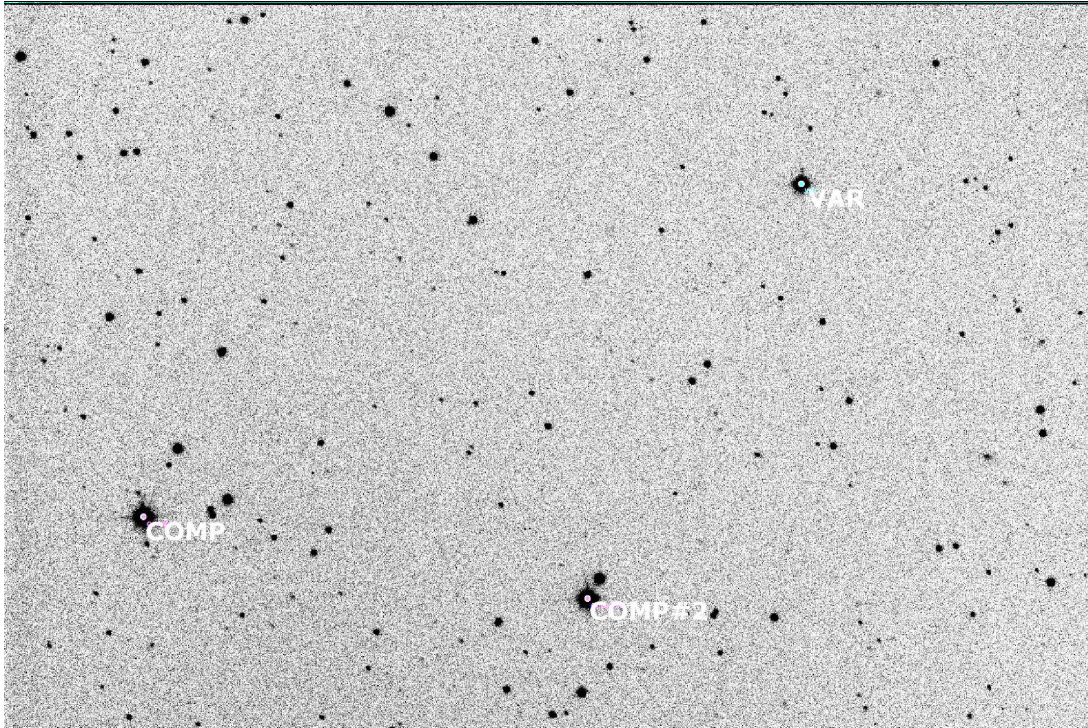


Abbildung 27: Übersicht der Sterne im Referenz-Frame (invertiert). Oben ist Norden, links ist Osten.

Lichtkurve/Messung	Transitmitte ($JD - 2455393$)	Transitmitte ($HJD - 2455393$)	HJD-Korr.	Transitdauer (min)	Transittiefe (mag)
Original-LC	$0,39684 \pm 0,00471$	$0,39966 \pm 0,00471$	0,00282	$226,6 \pm 15,7$	$0,0359 \pm 0,0018$
Korrigierte-LC	$0,41464 \pm 0,00070$	$0,41746 \pm 0,00070$	0,00282	$177,5 \pm 2,1$	$0,0169 \pm 0,0010$
ETD-Vorhersage		0,41400		$175,248 \pm 1,728$	0,0136

Tabelle 2: Ergebnisse des ETD-Modell-Fits.

Der Vergleich zwischen der original- und der „korrigierten“ Lichtkurve zeigt signifikante Unterschiede im Ergebnis. So sind alle Transitparameter der Original-Lichtkurve trotz eines „data quality indicator“ von $DQ = 1$ weit von Ergebnissen aus früheren Beobachtungen und der Vorhersage entfernt. Die Beobachtung und Vorhersage stimmen auch nicht in den Fehlergrenzen überein. So ist diese Transitmessung trotz des hohen Aufwandes und der betriebenen Sorgfalt nicht gelungen.

Wendet man eine in Abschnitt 4.2.2 beschriebene, gezielte Korrektur auf die original-Lichtkurve an, so werden Unterschiede anhand der Ergebnisse sehr deutlich sichtbar. Die „Messung“ stimmt dann in der Tat mit der Vorhersage sehr gut überein. Ohne die genaue Kenntnis der Ursachen für das Auftreten des systematischen Fehlers ist solch eine Korrektur nicht erlaubt. Alle Änderungen der Versuchsparameter wurden während der Beobachtung protokolliert, d. h. man müsste die Ursachen anhand des Protokolls

finden können. Eine Korrektur ist eher unwahrscheinlich, da die Ursachen für den „Offset“ (Sprung) in der Lichtkurve nicht eindeutig geklärt ist.

Danksagung

Ich möchte gerne Prof. Dr. Johannes Ohlert (TH Mittelhessen, Campus Friedberg) für die ausgezeichnete Betreuung des Versuches danken. Er lud mich freundlicherweise zur Beobachtung des Transits nach Trebur ein und stellte mir alle Daten der Transitmessung zur Verfügung. Die Transitmessung ist ein äußerst komplexes Experiment mit vielen unbekannten Parametern. Ich durfte selbst sehen, welche Herausforderungen hinter solch einer Messung stecken und welchen Erfahrungsschatz man benötigt, damit solch eine Messung gelingt. Da die Entdeckung eines Exoplaneten gerade mal 20 Jahre zurück liegt, können Transitmessungen als eine Art Pionierarbeit aufgefasst werden. Ich hoffe nur, dass solche Experimente irgendwann in ferner Zukunft den Einzug in ein Klassenzimmer finden werden!

Literatur

- [1] Jean Schneider. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 2 f.).
- [2] Harald [Hrsg.] Bennett Jeffrey O. ; Lesch, Hrsg. *Astronomie : die kosmische Perspektive*. 5., aktualisierte Aufl. ph - physik. Universität Mainz, Bereichsbibliothek Physik, Mathematik, Chemie / PMC [Signatur: US 1000 LES1 (5)]; Universität Mainz, Bereichsbibliothek Physik, Mathematik, Chemie / PMC / SEMESTERAPPARAT PALBERG/KABUSS WS 2012/2013 [Signatur: US 1000 LES1 (5) +2]; Pearson Studium, 2010, XXXIX, 1162 S. URL: <http://d-nb.info/992365538/04>; http://scans.hebis.de/HEBCGI/show.pl?21532432_cov.jpg (siehe S. 2, 4).
- [3] NASA. *Hubble-Aufnahme von Fomalhaut b, Pressemitteilung vom 13.11.2008*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 2).
- [4] ESO. *Veröffentlichung über Exoplaneten Gliese 581 e und d, ESO-Pressemitteilung vom 21.4.2009*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 3).
- [5] ESO. *Gliese 667C reexamined, ESO-Pressemitteilung vom 25.6.2013*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 3).
- [6] HATnet. *HATnet project*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 3).
- [7] Jean Schneider. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 3).
- [8] G. Á. Bakos u. a. „HAT-P-5b: A Jupiter-like Hot Jupiter Transiting a Bright Star“. In: *The Astrophysical Journal Letters* 671.2 (2007), S. L173. URL: <http://stacks.iop.org/1538-4357/671/i=2/a=L173> (siehe S. 3).
- [9] Wright et al. *The Exoplanet Orbit Database*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 5).
- [10] Astronomiestiftung Trebur. *Instrumente am T1T*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 6).
- [11] Astronomiestiftung Trebur. *Foto des Treburer 1-Meter Teleskops*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 6).
- [12] SBIG. *Handbuch zur CCD-Kamera SBIG STL-6303E*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 6).
- [13] Wikipedia.org. *Wikipedia-Artikel über Magnituden in der Astronomie*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 9).
- [14] James Berry Richard ; Burnell. *The handbook of astronomical image processing*. 2. ed, 2. print. [Signatur: ast 875 3 Aufl. 2]; Willmann-Bell, 2006, XXVIII, 683 S. (Siehe S. 10 f.).
- [15] Munipack. *User Guide, Photometry Corrections* (siehe S. 10).
- [16] Czech Astronomical Society. *Exoplanet Transit Database*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 13, 22 f.).
- [17] C-MUNIPACK. *“Package of software utilities for reducing astronomy CCD images intended on a observation of variable stars”* (siehe S. 14, 16).
- [18] Cartes du Ciel. *Cartes du Ciel, Free software to draw sky charts* (siehe S. 15).

- [19] US Naval Office. *USNO CCD Astrograph Catalog (UCAC4)*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 15).
- [20] Czech Astronomical Society. *“Model-fit your data”, Bereich der Homepage zum Fitten der Daten*. Abgerufen am 10. Juli 2013 (siehe S. 23 f.).