

Beobachtung von Exoplaneten-Transits mit Amateurmitteln

von Jürgen Dirscherl

Auch 25 Jahre nach der ersten Entdeckung eines Planeten, der um eine fremde Sonne kreist, hat das Thema Exoplaneten nichts von seiner Faszination eingebüßt. Ebenfalls im VdS-Journal für Astronomie wurde bereits mehrfach dazu berichtet. Von den verschiedenen Nachweismethoden für Exoplaneten hat sich die Transitmethode als die einfachste für Amateure herausgestellt. Der Lichteinbruch beim Vorbeiziehen eines Planeten vor seinem Stern lässt sich auch bei widrigen Bedingungen (s. u.) recht präzise messen. Obwohl nur bei einem kleinen Teil der Exoplaneten die Umlaufbahn hinreichend genau in der Sichtlinie für einen Transit verläuft, sind inzwischen hunderte bekannt, mit zum Teil erstaunlich hohem Lichteinbruch bis zu 0,04 mag (= 3,8%). Zum Vergleich: Die Erde würde nur einen Lichteinbruch um 0,008% verursachen, Jupiter um 1%.

Die Exoplanet Transit Database (ETD) [1] listet bestätigte Transits auf und erlaubt die Vorhersage beobachtbarer Ereignisse. Am leichtesten zu beobachten sind „Hot Jupiters“, also Gasriesen, die auf sehr engen Bahnen um ihre Muttersterne kreisen (mit entsprechend hohen Oberflächentemperaturen oft $>1.000\text{ °C}$), mit Umlaufzeiten von teilweise nur einigen Tagen und Transitzeiten von wenigen Stunden. Als Einsteiger in dieses Thema (und ohne jede Erfahrung auch mit der Beobachtung von Veränderlichen) suchte ich in der Datenbank nach Transits mit mind. 0,02 mag Lichteinbruch. Nach mehreren am Wetter gescheiterten Versuchen gelang die Beobachtung des Transits von HAT-P-32b um seinen Mutterstern am 29.12.2019.

Als Teleskop kam ein fotografisch optimierter Newton-Reflektor mit Öffnung 250 mm und Brennweite 1.000 mm zum Einsatz. Dank Carbon-Tubus und konischem Quarz-Hauptspiegel (Strehl 0,99 für

1 Newton-Reflektor 250 mm/1.000 mm auf Knicksäule (Johann-Kern-Sternwarte Wertheim, rechts 6-Zoll-Refraktor)



Haupt- und Fangspiegel) ist der Fokus auch über mehrere Stunden Beobachtungszeit stabil. Der Tubus lässt sich auf eine ALT-5-Montierung auf einer Knicksäule (Abb. 1) der Johann-Kern-Sternwarte Wertheim [2] montieren, wodurch problemlos mehrstündige Belichtungen möglich sind. Zur Nachführung dient ein kleiner Refraktor (Öffnung 80 mm mit Brennweite 400 mm) mit Kamera ZWO ASI 178 und Nachführungssoftware PHD 2. Die eigentlichen Aufnahmen wurden mit einer gekühlten monochromen CMOS-Kamera ZWO ASI1600MMC bei -20 °C Chiptemperatur und Komakorrektor durchgeführt. Als Filter wurde lediglich ein IR/UV-Blockfilter verwendet.

Die Datenaufnahme erfolgte mit Firecapture. Der Mutterstern HAT-P-32 im Sternbild Andromeda hat eine (visuelle) Helligkeit von 11,3 mag. Dies klingt nach wenig, doch darf der Stern keinesfalls überbelichtet werden. Die Kamera ASI1600 zeigt bereits ab 75% des Vollsignals erste Sättigungseffekte.

Um diese sicher auszuschließen, wurde das Signal des Muttersterns auf ca. 50% eingestellt. Dazu musste die Belichtungszeit selbst bei Verstärkung Null auf nur noch 20 s reduziert werden. Der Transit am 29.12.2019 war von ETD für die Zeit von 18:57 bis 22:03 Uhr (MEZ) vorhergesagt. Daher wurde die Aufnahmesequenz bereits gegen 18 Uhr gestartet, und bis 22:38 Uhr wurden ununterbrochen Aufnahmen durchgeführt, resultierend in insgesamt 810 Bildern (aufgrund der Bildladezeit benötigte jede Aufnahme 20,93 s). Der Bildausschnitt wurde so klein wie möglich gewählt, jedoch noch so groß, dass mindestens vier Referenzsterne im Bild zu sehen waren. Aufgrund der präzisen Nachführung war der Bildausschnitt über die gesamte Aufnahmesequenz nahezu konstant.

Leider zogen während dieser Zeit immer wieder Schleierwolken durch das Bild, so dass ich kaum Hoffnung auf ein verwertbares Ergebnis hatte. Die Intensität des



2 HAT-P-32 sowie die vier Referenzsterne

Zielsterns ging teilweise bis auf 45% des Maximalwertes zurück. Erstaunlicherweise waren jedoch nur wenige Datenpunkte völlige Ausreißer und es konnte eine relativ gute Lichtkurve erfasst werden. Zur relativen Helligkeitsbestimmung hatte ich bereits gute Erfahrungen mit der Software Fitswork gemacht. Dazu wird der zu bestimmende Stern mit Taste „L“ markiert und anschließend die relative Magnitude von Referenzsternen mit Taste „M“ bestimmt. Fitswork arbeitet nicht mit einer Apertur, sondern fittet eine Gaußkurve in das jeweilige Sternbild, so spielen weder Hintergrund noch Apertur eine Rolle. Da eine Auswertung von 810 Bildern mit jeweils vier Referenzsternen sehr mühsam erschien und ich zudem Zweifel hatte, ob das Fitten einer Gaußkurve durch Fitswork bei einem verrauschten Sternbild noch gut funktioniert, wurden vorab jeweils 10 Bilder (nach Abzug von Darks) überlagert und anschließend die 81 Summenbilder wie oben beschrieben vermessen. Vor einer fotometrischen Auswertung dürfen die Bilder in keiner Weise bearbeitet werden. Auf die Anwendung von Flats wurde in Anbetracht des kleinen, zentral gelegenen Bild-

ausschnitts und der stabilen Lage auf dem Chip verzichtet.

Fitswork berechnet die relative Magnitude mit einer Auflösung von 0,01 mag, mit vier Sternen ergibt sich damit eine Auflösung von 2,5 mmag. Die Abbildung 2 zeigt HAT-P-32 sowie die vier verwendeten Referenzsterne (bezeichnet mit 1 bis 4, keine veränderlichen Sterne). Diese sind 0,08 bis 1,5 mag schwächer als der Zielstern. Für diese Abbildung wurden die 81 Summenbilder überlagert und das Histogramm gestreckt. Die aus den 81 Summenbildern ermittelten jeweils vier relativen Magnituden wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen und für jedes Summenbild gemittelt. Der Mittelwert vor und nach der Bedeckung wurde auf die Nulllinie normiert, wobei eine minimale lineare Drift von 2 mmag vom Start zum Ende herausgerechnet wurde. Die Abbildung 3 zeigt die gemessene Lichtkurve (blaue Punkte), aufgetragen über der lokalen Zeit (MEZ) mit Fehlerbalken von 5 mmag. Die rote Linie zeigt den gleitenden Mittelwert über 10 Punkte zur besseren Veranschaulichung.

Die Daten wurden auch auf die Website der ETD hochgeladen und mit der theoretisch zu erwartenden Bedeckungskurve verglichen. Das Ergebnis (Abb. 4 und [3]) zeigt eine – für die schlechten Aufnahmebedingungen – erstaunlich gute Übereinstimmung. Ein Fit der gemessenen Daten mit Hilfe der Tools auf der ETD-Website ergab folgende Parameter:

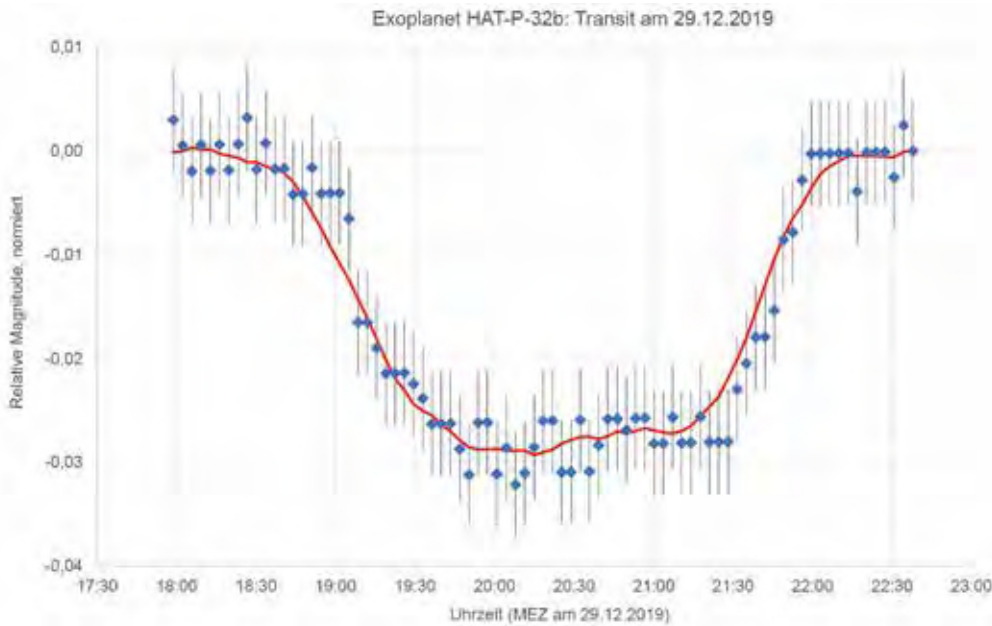
$$T_{\min}: \text{HJD} = 2458847,31093 \pm 0,00047 = (19:23:25 \pm 41 \text{ s}) \text{ Uhr MEZ am } 29.12.2019$$

Lichteinbruch um: $(0,0282 \pm 0,0005) \text{ mag}$

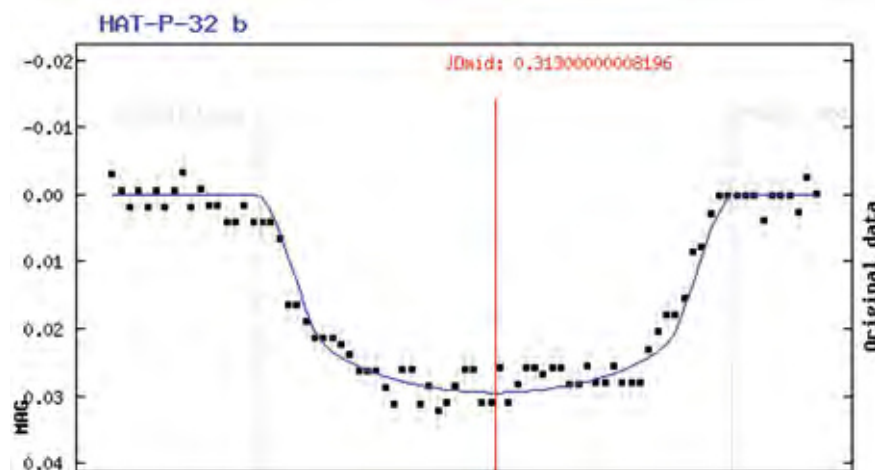
Bedeckungsdauer: $(186,9 \pm 1,6) \text{ min}$

Eine gleichmäßige Abschwächung des Lichts von Ziel- und Referenzsternen durch Wolken führt zu keiner Beeinflussung des relativen Magnitudenwertes. Dennoch ist bei Durchzug einer Wolke natürlich mit einer unterschiedlichen temporären Beeinflussung der fünf Sterne zu rechnen, die sich auch in diesen Daten in Messfehlern und erhöhten Schwankungen ausdrückt. Bei optimalen Verhältnissen (ohne Wolken) ist sicherlich eine deutlich bessere Datenqualität zu erwarten. Bedeckungen mit unter 0,01 mag Tiefe sollten noch gut nachweisbar sein. Eine weitere positive Botschaft ist, dass auch bei widrigen Verhältnissen wie Dunst, schlechter Transparenz oder Mondschein solche Messungen noch möglich erscheinen, wenn die Astrofotografie lichtschwacher Objekte schon unmöglich ist.

Der beobachtete Exoplanet wurde bereits 2004 vom HATnet (Hungarian Automated Telescope Network) am Stern GSC 3281-00800 (seitdem neue Bezeichnung: HAT-P-32) gefunden. Aufgrund starker Schwankungen im Spektrum des Sterns („Jitter“) konnte der Planet erst 2011 mit Spektren vom Keck-Teleskop bestätigt werden. HAT-P-32 ist ca. 950 Lichtjahre von uns



3 Gemessene Lichtkurve von HAT-P-32b am 29.12.2019. Blaue Punkte: Messdaten (je 209 s Abstand), rote Kurve: gleitender Mittelwert über 10 Punkte



4 Messdaten (aus Abb. 3) mit theoretischer Verdunkelungskurve (erzeugt auf ETD)

entfernt und selbst ein Doppelstern: HAT-P-32A ist ein G- bis F-Stern, etwas schwerer und 2,4-mal leuchtstärker als die Sonne. Die zweite Komponente (HAT-P-32B) ist ein M-Zwerg mit etwa halber Sonnenmasse, er ist 2,9" entfernt vom Hauptstern und 3,4 mag schwächer. In den Aufnahmen ist er nicht zu erkennen (eventuell mit IR-Filter trennbar?).

Der Exoplanet HAT-P-32b umkreist den Hauptstern in nur 2,15 Tagen in einem Abstand von gerade 0,03 AE. Seine Oberflächentemperatur wird auf 1.890 K geschätzt. Seine Bahnebene ist $1,3^\circ$ gegen die Sichtlinie geneigt. Die Masse des Planeten beträgt ca. 80% der von Jupiter, er hat aber fast doppelte Größe. Dieser „aufgeblähte“ Exoplanet wurde wissenschaftlich genauer untersucht [4]. Die Ursache für die enor-

me Größe ist unklar. Die Bedeckungskurve wurde in verschiedenen Wellenlängen gemessen [5] und deutliche Unterschiede von Rot zu Blau gefunden, die auf Partikel in den Wolken und Dunst hinweisen. Eine weitere Untersuchung des Systems im UV ergab einen scheinbar größeren Planetenradius bei kürzeren Wellenlängen, was auf Aerosol-Partikel in der Planetenatmosphäre hindeutet [6].

Eine Messung der Bedeckungskurve von „Hot Jupiters“ mit unterschiedlichen Filtern von UV bis IR wäre auch mit Amateurmethoden möglich und öffnet ein weites Betätigungsfeld. Transits von erdähnlichen Planeten führen zu einem Lichteinbruch von bestenfalls wenigen mmag und stellen eine echte Herausforderung dar.

Literatur- und Internethinweise (geprüft 30.03.2020):

- [1] S. Poddany, L. Brat, O. Pejcha, 2010: "Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits", *New Astron.* 15 (2010), pp. 297-301, (arXiv:0909.2548v1), <http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>
- [2] Sternwarte Wertheim, Homepage: www.sternwarte-wertheim.de/
- [3] Auswertung Transit: <http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1577901607>
- [4] J.D. Hartman et al., 2011: "HAT-P-32b AND HAT-P-33b: Two highly inflated hot Jupiters transiting high-jitter stars", <https://arxiv.org/abs/1106.1212v1>
- [5] J. Tregloan-Reed et al., 2017: "Possible detection of a bimodal cloud distribution in the atmosphere of HAT-P-32Ab from multi-band photometry", <https://arxiv.org/abs/1712.00415v1>
- [6] M. Mallon, H.R. Wakeford, 2017: "Near-UV transit photometry of HAT-P-32 b with the LBT: Silicate aerosols in the planetary atmosphere", <https://arxiv.org/abs/1707.08328v2>