

# Photometrischer Nachweis des Exoplaneten HAT-P-68b

## Einleitung

In der Astronomie versteht man unter Photometrie die Helligkeitsbestimmung von Sternen. Dies geschieht mittlerweile fast nur noch mittels Satelliten, da um die nötige Präzision zu erzielen der Einfluss der Atmosphäre, der genaue Wert der Extinktion ist nicht bekannt, auf die Helligkeit zu groß wäre. Auf der Erde beschränkt man sich daher hauptsächlich auf die Bestimmung des Helligkeitsunterschiedes zwischen dem zu messenden Stern und einem Referenzstern mit bekannter Helligkeit. Diese Methode nennt sich differentielle Photometrie und ist auch für Amateurastronomen relativ leicht umzusetzen. Grundsätzlich reicht dazu bereits eine einfache Kamera, wie es Gerald Lasnik (Bericht: [B Bet 2020.pdf](#)) bereits bei Beteigeuze gezeigt hat. Sehr interessant ist die Vermessung schnell veränderlicher Sterne mit dieser Methode. Dies habe ich bereits mehrmals durchgeführt. Als Beispiel der Stern BL Cam vom 26/27.12.2020.

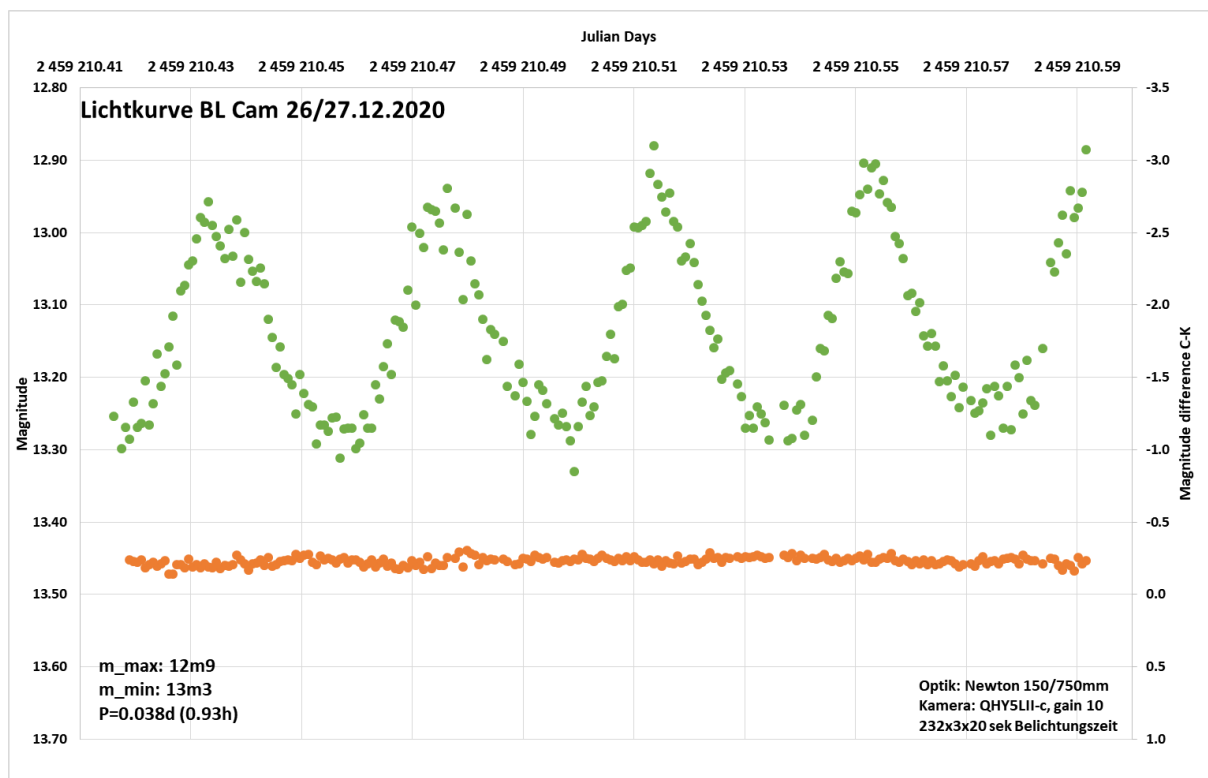


Abbildung 1: Lichtkurve von BL Cam

Durch diese Ergebnisse ermutigt kam mir der Gedanke, dass sich doch auch ein Exoplanetentransit nachweisen lassen sollte. Das gehört zur Königsdisziplin in der Photometrie. Mit meinen bereits gemessenen Lichtkurven kam ich zum Ergebnis, dass ein Helligkeitsabfall von mindestens 2% in den Daten ersichtlich sein sollte. Die stärksten Helligkeitsabfälle bei Exoplanetentransitereignissen bewegen sich im Bereich 3-4%.

# Beobachtungsplanung

Um festzustellen wo und wann sich ein Exoplanetentransit ereignet nutze ich die Website <https://astro.swarthmore.edu/transits/transits.cgi>. Wie man sofort sieht finden pro Nacht ca. 50 ganz bzw. teilweise beobachtbare Transits statt. Ein genauerer Blick zeigt aber schnell, dass nur wenige für mein Vorhaben in Frage kommen.

Bedingungen für die Auswahl:

- Stern heller 14mag
- Helligkeitsänderung >2% bzw. >20 ppt
- Gesamter Verlauf beobachtbar

Mit diesen Bedingungen ergibt sich theoretisch alle 1-2 Tage eine Gelegenheit für eine Beobachtung. Um die benötigte Messgenauigkeit zu erreichen sind die Beobachtungsbedingungen sehr wichtig. Vor allem müssen diese während der Messung möglichst stabil sein.

Nach mehreren Versuchen, die wegen schlechter Bedingungen wie Wolken, Wind, aber auch technischer Probleme keine Ergebnisse bzw. keine eindeutig ersichtlichen Helligkeitseinbrüche in den Daten zeigten, konnte ich in der Nacht von 27/28. Februar 2021 meinen ersten Exoplaneten nachweisen. Eine weitere Gelegenheit der Beobachtung des gleichen Exoplanetentransits ergab sich eine Woche später am 6. März 2021.

Results shown for Other Site latitude = 47.04, longitude = 15.22.

Colored text indicates a part of the transit that is during daylight, or a transit at elevation less than the user-specified limits, or that the Moon is relatively full and close to the target.

Click on column headers to sort the table by that column. Click again to reverse the sorting order. To sub-sort, first click one column (e.g. the left-hand one to sort by night), then *shift-click* another column to sort further within the first category. For example, to sort by priority within a given night (when multiple nights are displayed), first click the "Local evening date" header, then shift-click the "Priority" header. The highlighted column shows the current sorting.

The buttons can be used to toggle the visibility of columns, and the column order can be rearranged by clicking and dragging the column header.

Search:  Show if visible transit % + baseline % > 0  V<sub>max</sub>:

Local evening date	Name	V or Kepler mag	Start—Mid—End	Duration	BJD <sub>TDB</sub> start—mid—end	Elev. at start, mid, end ±1.0 hrs	% of transit (baseline) observable, Suggested obs. start, end	Az. at start, mid, end ±1.0 hrs	HA at start, mid, end ±1.0 hrs	RA & Dec (J2000)	Period (days)	Depth (ppt)	Comments
Sat. 2021-02-27: Nautical twilight 2021-02-27 18:47 — 2021-02-28 05:35 local time / 2021-02-27 17:47 — 2021-02-28 04:35 UTC													
Sat. 2021-02-27	<a href="#">HAT-P-68 b</a> Finding charts: <a href="#">Annotated</a> , <a href="#">Aladin</a> , <a href="#">SkyMap</a> , <a href="#">Airmass plot</a> , <a href="#">ACP plan</a> Info: <a href="#">Exoplanet Archive</a> , <a href="#">Simbad</a> , <a href="#">Gaia</a> , <a href="#">TIC</a>	13 937	21:51 22:51— 23:53 —00:56 01:56 ±0:01	2:05	9273.4152 9273.4588 9273.5023	66° 61° 32° 42° 32°	 100% (100%) 21:50—01:57	196° 225° 246° 261° 272°	+0.5 +1.5 +2.5 +3.6 +4.6	07:53:55.9828 +23:56:17.6117	2.30	27.0	
Sat. 2021-03-06: Nautical twilight 2021-03-06 18:57 — 2021-03-07 05:22 local time / 2021-03-06 17:57 — 2021-03-07 04:22 UTC													
Sat. 2021-03-06	<a href="#">HAT-P-68 b</a> Finding charts: <a href="#">Annotated</a> , <a href="#">Aladin</a> , <a href="#">SkyMap</a> , <a href="#">Airmass plot</a> , <a href="#">ACP plan</a> Info: <a href="#">Exoplanet Archive</a> , <a href="#">Simbad</a> , <a href="#">Gaia</a> , <a href="#">TIC</a>	13 937	19:21 20:21— 21:23 —22:26 23:26 ±0:01	2:05	9280.2104 9280.3540 9280.3975	60° 66° 66° 61° 52°	 100% (100%) 19:20—23:27	132° 160° 196° 226° 246°	-1.6 -0.6 +0.5 +1.5 +2.5	07:53:55.9828 +23:56:17.6117	2.30	27.0	

Abbildung 2: Transitvorhersage, Quelle: <https://astro.swarthmore.edu/transits/transits.cgi>

## Über HAT-P-68b

Im Oktober 2020 wurde ein Paper veröffentlicht in dem die Entdeckung eines Exoplaneten in den Daten des HATNet surveys um HAT-P-68 bekannt gegeben wurde. HATNet steht für Hungarian-made Automated Telescope Network und besteht aus 7 Teleskope die sich am Mount Hopkins (5 Teleskope) und am Mauna Kea (2 Teleskope) befinden. [2]

HAT-P-68 ist ein Zwergstern der Spektralklasse K5 mit einer Helligkeit von 13.937 mag und befindet sich in einem Abstand von 202.93 pc (ca. 660 Lj) im Sternbild Zwillinge (J2000, RA 07:53:55.9828, Dec +23:56:17.6117). Mit einer Masse von 0.673 Sonnenmassen und einem Radius von 0.6726 Sonnenradien ist er deutlich kleiner als unsere Sonne.

Sein Begleiter erzeugt eine Helligkeitsabfall von 0.036 mag (r-band) und zählt zu den Hot Jupiter Planeten. Für ihn werden eine Masse von 0.724 Jupitermassen, ein Radius von 1.072 Jupiterradien bei einer Temperatur von 1027 K angegeben, der Abstand zum Stern mit 0.02996 AE. [1]

## Durchführung

Für die Messung wird ein 6" f5 Newton Teleskop auf EQ5 verwendet. Die Einstellungen der Kamera wurden so gewählt, dass sich für den Stern ein maximaler Pixelwert von ca. 180 Counts ergab. Dies stellt sicher, dass der Stern nicht überbelichtet wird, aber trotzdem ein möglichst hohes Signal zur Verfügung steht. Es ist auch darauf zu achten, dass sich im Sternfeld weitere Sterne befinden die als Vergleichssterne verwendet werden können (nicht überbelichtet, aber auch nicht zu schwach). Um die Belichtungszeit zu senken wurde die Kamera im 2x2 Binning Modus betrieben. Zusätzlich wurde zur Verbesserung des Rauschverhaltens der Kamera eine Peltierkühlung (Selbstbau) verwendet.

Im Unterschied zur Deepsky Fotografie wird eine gewisse zeitliche Auflösung benötigt um den Verlauf der Helligkeit darstellen zu können. Für Exoplaneten strebt man eine zeitliche Auflösung von max. 1 Minute an, um den Helligkeitsverlauf beim Ein- bzw. Austritt des Planeten vor der Sternscheibe darstellen zu können. Daraus ergaben sich folgende Einstellungen für die beiden Beobachtungen:

*Tabelle 1: Einstellparameter*

<b>Datum:</b>	<b>27/28.2.2021</b>	<b>06.03.2021</b>
<b>Beobachtungszeit:</b>	21:52-1:58 (MEZ)	19:28-23:35 (MEZ)
<b>Optik:</b>	6" f5 Newton	6" f5 Newton
<b>Kamera:</b>	QHY5LII-c	QHY5LII-c
<b>Einzelbelichtungszeit:</b>	15 Sekunden	20 Sekunden
<b>Bildanzahl:</b>	885	694
<b>Mittelung:</b>	4*15 Sekunden=60 Sekunden	3*20 Sekunden=60 Sekunden
<b>Gain:</b>	21	20
<b>Binning:</b>	2x2	2x2
<b>Temperatur Peltierkühlung:</b>	-5°C bis -1°C, Ausfall der Kühlung während der Aufnahmen	-10 °C

Der Grund für die unterschiedlichen Einstellungen zwischen den beiden Beobachtungen liegt hauptsächlich am Vollmond der sich am 27.02.2021 ereignete und folglich am Himmel stand.

Die Steuerung der Montierung und der Kamera wurde mittels KSTARS/Ekos auf einem Raspberry PI durchgeführt.

Die Kalibrierung der Bilder mittels Dark-, Flat- und Biasframes erfolgte in Fitswork. Die photometrische Auswertung wurde mit dem Programm MuniWin 2.1 durchgeführt.

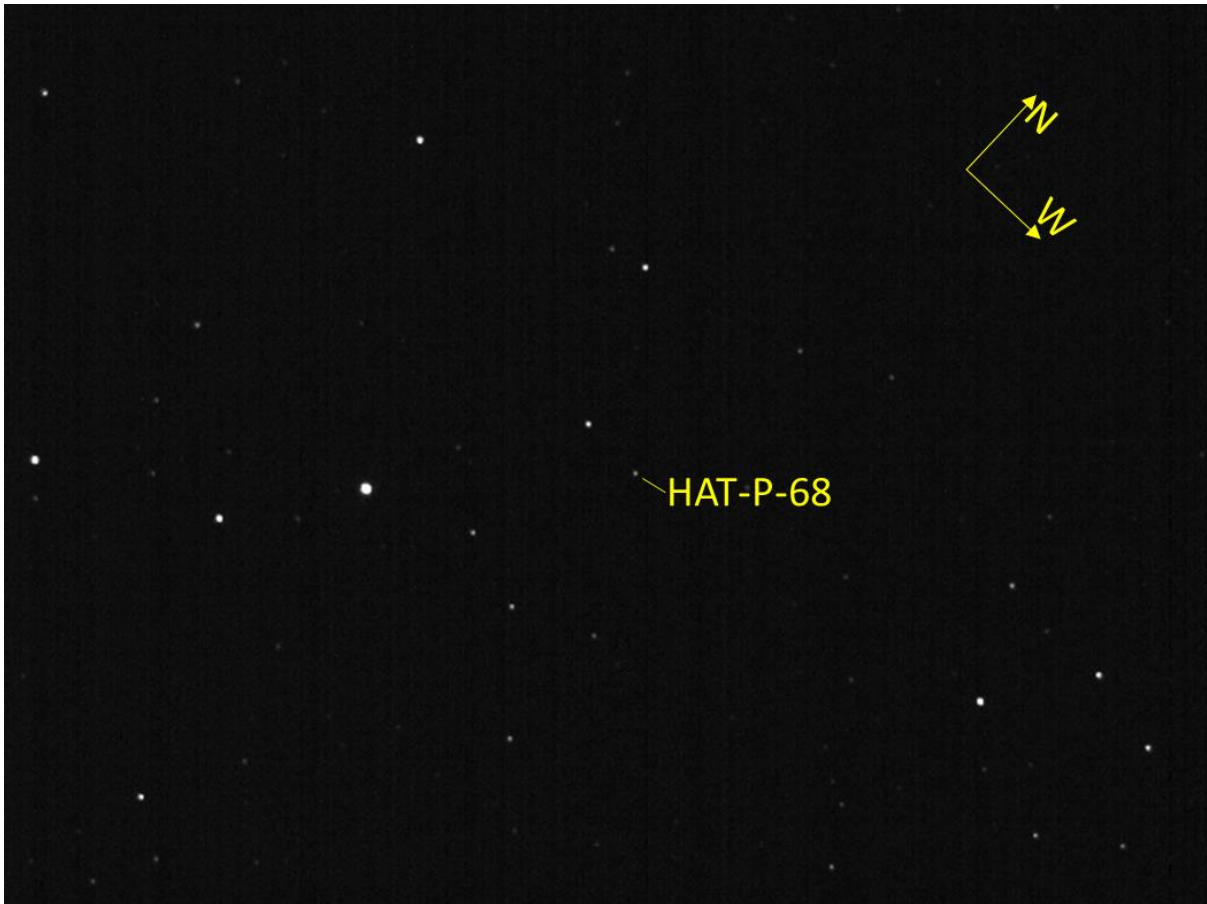


Abbildung 3: Kalibriertes Einzelbild mit HAT-P-68, Grenzgröße ca. 15mag

## Auswertung

Nach der Kalibrierung werden die Bilder in MuniWin 2.1 weiter vorbereitet und der Helligkeitsunterschied zwischen Variablen- und Vergleichssterne ermittelt. Ein Prüfsterne dient zur Kontrolle der Ergebnisse.

Der absolute Wert der Helligkeit ist dabei nur von geringen Interesse. Aus den Helligkeiten in Magnituden wird die relative Änderung des Lichtstromes  $s/s_0$  ermittelt.

Diese kann leicht über die Gleichung

$$m - m_0 = -2.5 \lg \frac{s}{s_0} \quad \rightarrow \quad \frac{s}{s_0} = 10^{\frac{m_0 - m}{2.5}} \quad (1)$$

$m$ ...Helligkeit in Mag

$m_0$ ...Referenzhelligkeit in mag

$s$ ...Lichtstrom in Im

$s_0$ ...Referenzlichtstrom in Im

ermittelt werden.

## Ergebnis

Als Ergebnis erhält man den relativen Lichtstrom in Abhängigkeit der Zeit. In einem Diagramm dargestellt ergibt sich die Lichtkurve von HAT-P-68 (Abbildung 4 und Abbildung 5).

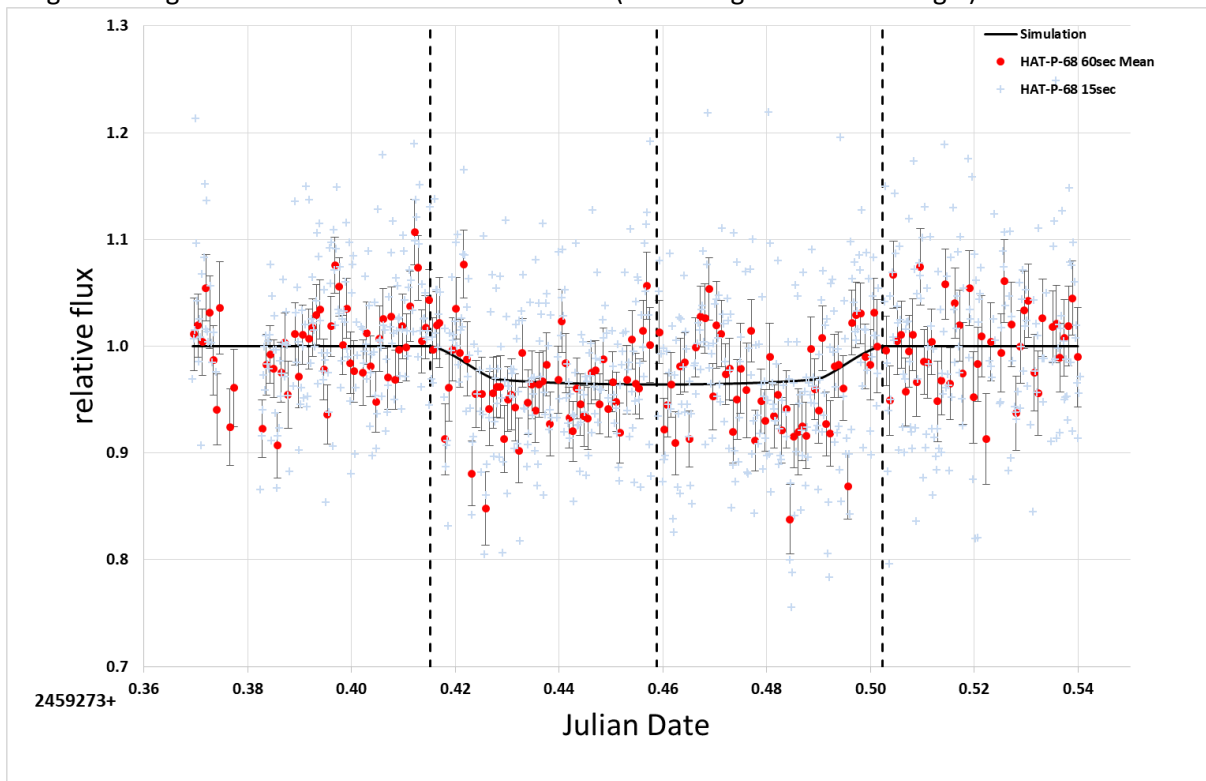


Abbildung 4: Lichtkurve von HAT-P-68 vom 27.02.2021

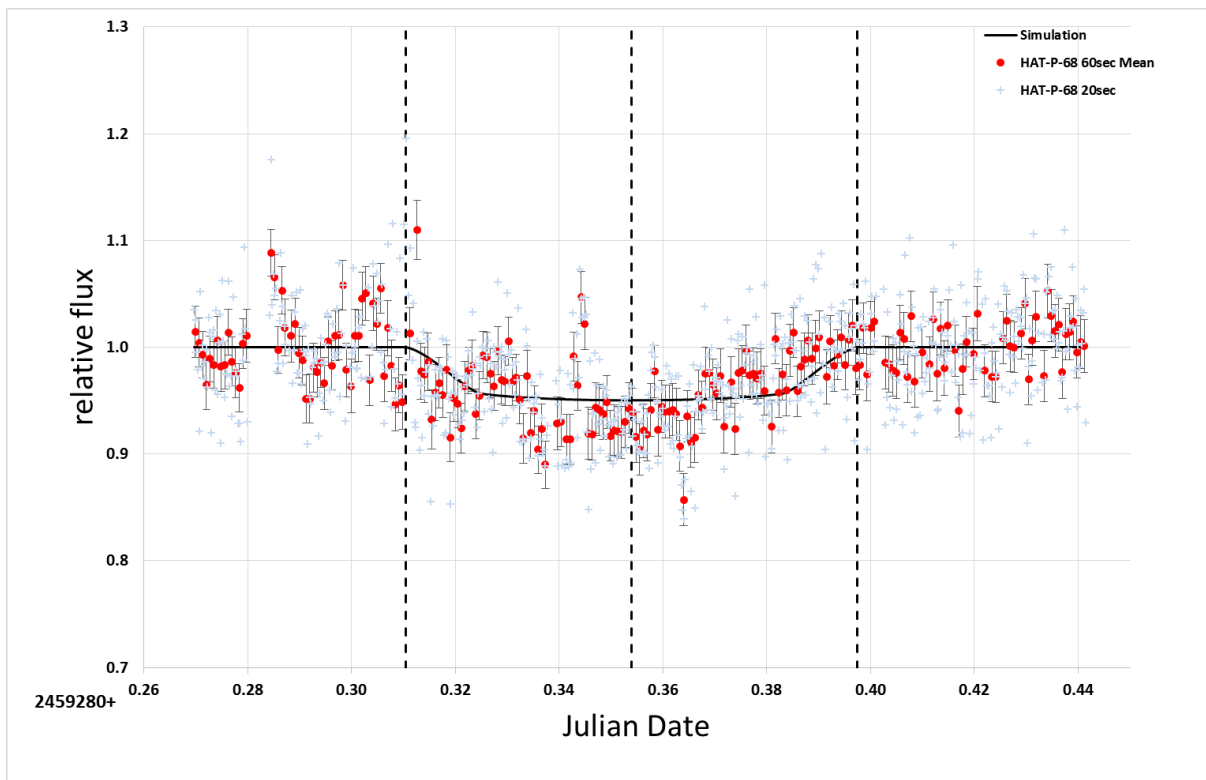


Abbildung 5: Lichtkurve von HAT-P-68 vom 06.03.2021

Dargestellt sind die Messwerte für 15 bzw. 20 Sekunden Belichtungszeit (hellblaue Kreuze), der Mittelwert über 60 Sekunden (rote Punkte) sowie das Simulationsmodell des Helligkeitsverlaufes (schwarze Linie). Zusätzlich sind Beginn, Mitte und Ende des Transits durch vertikale gestrichelte schwarze Linien eingezeichnet. Die Daten dazu stammen aus der Transitvorhersage (Abbildung 2).

Die simulierte Lichtkurve wurde mit Daten für die verdunkelte Helligkeit aus den Messwerten erstellt. Der „Limb Darkening Effect“ wurde im Modell mit einem Faktor von 0.3 berücksichtigt. Dieser wurde aus einer Aufnahme der Sonne ermittelt und angenommen, dass dieser Faktor auch für andere Sterne einen ähnlichen Wert annimmt.

Die Messdaten zeigen einen deutlichen Helligkeitsrückgang von 0.034 (27.02.2021) bzw. 0.046 (06.03.2021). Dieser wird in [1] mit 0.036 mag angegeben. Dies ergibt umgerechnet mit Gleichung 1 eine relative Lichtstromänderung von 0.033 und entspricht für die Messung am 27.02.2021 sehr gut dem gemessenen Helligkeitsrückgang. Am 06.03.2021 wurde mit 0.046 ein größerer Helligkeitsrückgang gemessen. Aus dem Simulationsmodell lässt sich das Größenverhältnis im System abschätzen. Dieses ergibt, dass der Planet, um diesen Helligkeitsabfall verursachen zu können, einen Durchmesser von  $1/6.15$  (27.02.2021) bzw.  $1/5$  (06.03.2021) oder 16.3% bzw. 20% des Sternes haben muss. Die in [1] angegebenen Daten für die Größe von Stern und Planet ergeben einen Planetendurchmesser von 16% des Sterndurchmessers. Die Eingabe dieser Daten in das selbst erstellte Simulationsmodell sagt eine Lichtkurve voraus, deren Minimum sehr gut dem in [1] angegebenen Wert entspricht. Dies zeigt, dass das Simulationsmodell die Realität gut wiedergibt.

Die Beginn- und Endzeiten entsprechen der Vorhersage.

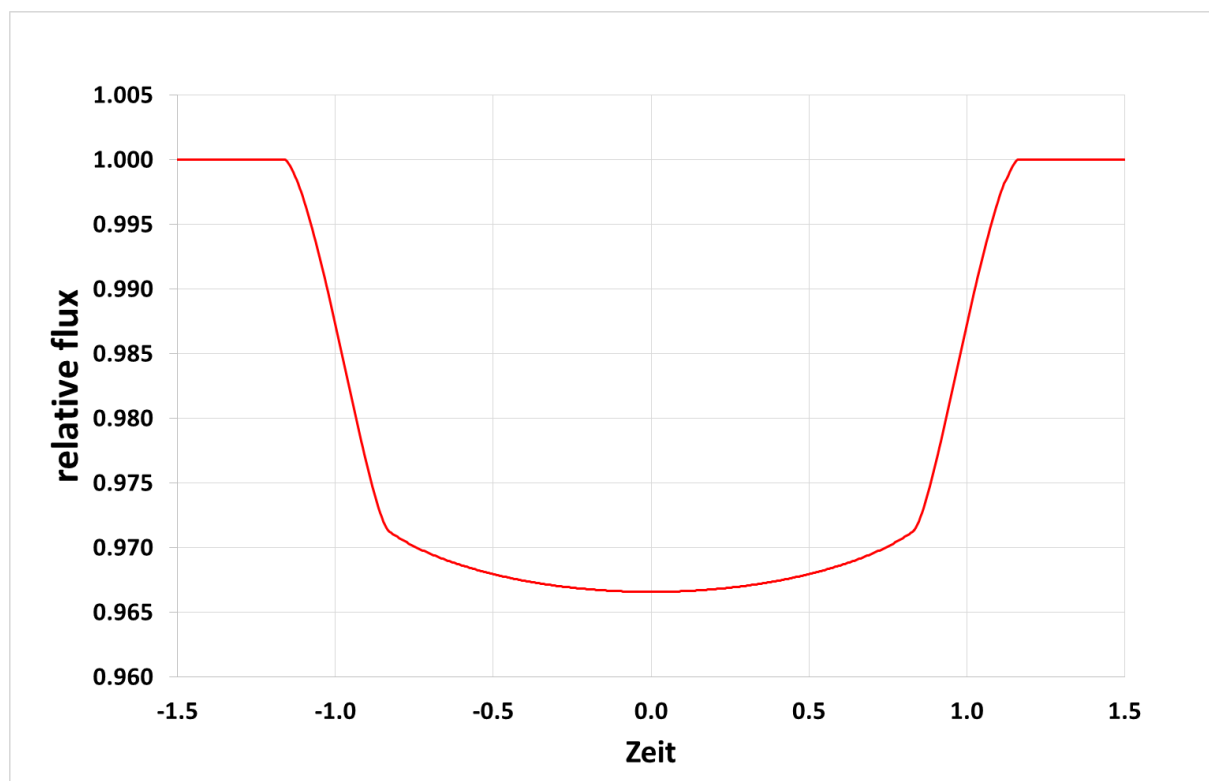


Abbildung 6: Simulierte Lichtkurve des Exoplanetentransits, Planetendurchmesser 16.4% des Sterndurchmessers, zentraler Durchgang.

Zum Vergleich der beiden Transitevents werden beide Kurven in ein Diagramm dargestellt. Die Kurve vom 06.03.2021 wird um 0.5 nach oben verschoben um eine bessere Darstellung zu erreichen. Zusätzlich wird die Zeitachse auf die Periodendauer normiert.

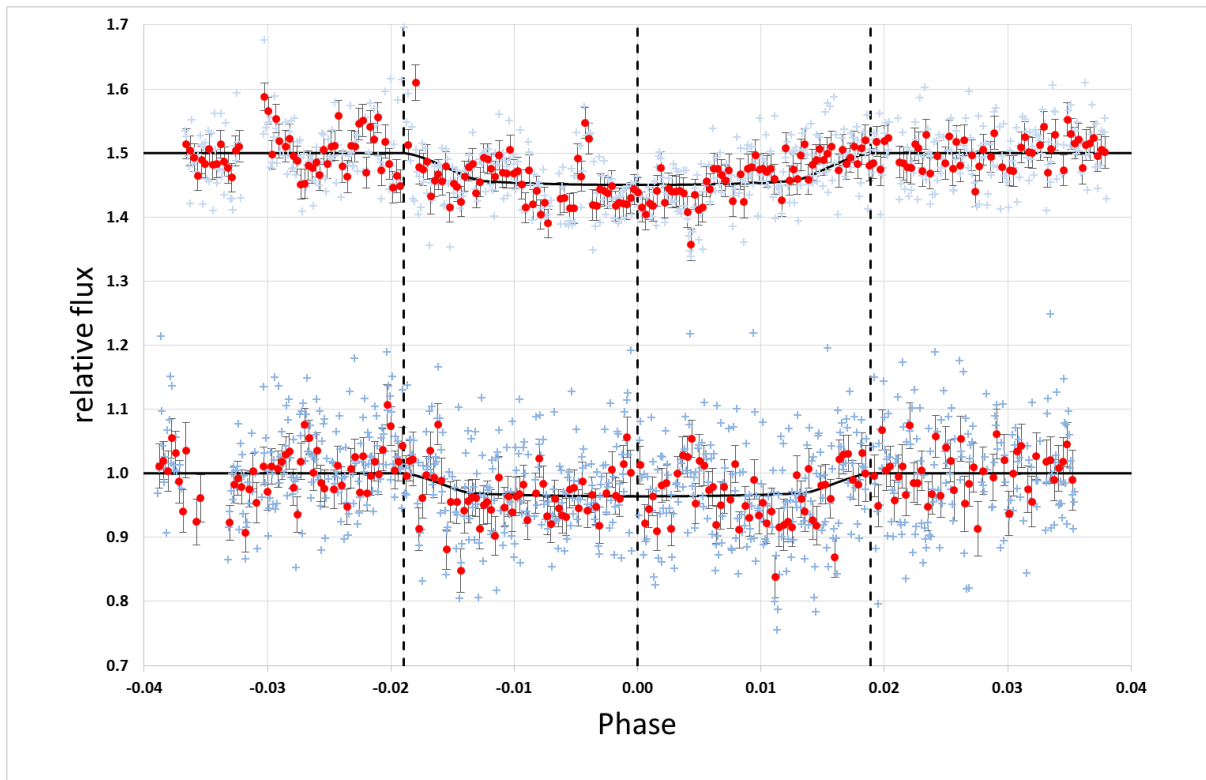


Abbildung 7: Lichtkurve HAT-P-68 vom 27.02.2021 (unten) bzw. 06.03.2021 (oben)

Auffällig ist die deutlich geringere Streuung der Messwerte am 06.03.2021. Diese ist wohl mit dem unter dem Horizont befindlichen Mond und mit der funktionierenden bzw. stärkeren Kühlung zu erklären. Zusätzlich ereignete sich dieser Transit bei idealer Himmelsposition. HAT-P-68 kulminierte am 06.03.2021 zwischen Beginn und Mitte des Transits.

## Verbesserungen

Es werden sicher noch weitere Versuche folgen. Um die Datenqualität zu erhöhen wären Verbesserungen notwendig:

1. Aufnahme ohne Mond → Stern hebt sich besser vom Hintergrund ab (mehr Nutzsignal). Die Messung am 06.03.2021 zeigen deutlich geringere Abweichungen.
2. Größere Optik → kürzere Einzelbelichtungszeiten bzw. schwächere Sterne für die Vermessung zugänglich
3. Guiding bei der Aufnahme → unterschiedliche Pixelempfindlichkeiten werden verhindert
4. Höhere Auflösung, 12, 14 oder 16bit anstatt nur 8bit → mehr Spielraum bei der Belichtungswahl, weniger Quantisierungsfehler

Leider lässt sich nur der 1. Punkt ohne neuer Hardware realisieren.

---

## Zusammenfassung

Wie am Ergebnis ersichtlich, ist der Nachweis eines Exoplaneten mittels Transitmethode bereits mit relativ einfachen Mitteln möglich. Der Transit am 27.02.2021 wurde in einer Vollmondnacht bei einer Sternhelligkeit von ca. 14mag aufgenommen. D.h. selbst wenn aufgrund des Mondes keine sinnvolle Beobachtung bzw. Astrofotografie möglich ist besteht die Möglichkeit auf die Exoplanetenjagd. Ein jeder der ein wenig Astrofotografie betreibt hat dazu die nötige Ausrüstung. Es braucht etwas Erfahrung, die man sich aber leicht durch die Vermessung schnell veränderlicher Sterne aneignen kann, und Geduld. Aber es lohnt sich und man bekommt einen Einblick in ein aktuelles Forschungsgebiet in dem nach wie vor immer wieder neue Entdeckungen gemacht werden.

## Quellen

- [1] Bethlee M. Lindor at al., HAT-P-68b: A TRANSITING HOT JUPITER AROUND A K5 DWARF STAR\*, 30. Oktober 2020.  
Freier Download: <https://arxiv.org/abs/2010.16026>
- [2] The HATNet Exoplanet Survey: <https://hatnet.org/>
- [3] Erik Wischnewski, Astronomie in Theorie und Praxis: Kompendium & Nachschlagewerk, 9. Auflage, Eigenverlag 2021, ISBN 978-3948774004
- [4] AAVSO, The AAVSO DSLR Observing Manual, Version 1.4, AAVSO 2016, ISBN 978-1-939538-18-5  
Freier Download: <https://www.aavso.org/dslr-camera-photometry-guide>
- [5] Bruce L. Gary, EXOPLANET OBSERVING FOR AMATEURS, Second Edition (plus), Mira Digital Publishing, St. Louis, MO, 2010, ISBN 978-0-9798446-3-8  
Freier Download: [http://brucegary.net/book\\_EOA/x.htm](http://brucegary.net/book_EOA/x.htm)
- [6] Aufsuchkarten: <https://app.aavso.org/vsp/>
- [7] Exoplaneten Transitvorhersage: <https://astro.swarthmore.edu/transits/transits.cgi>

## Software

MuniWin (freeware): <http://c-munipack.sourceforge.net/>

Fitswork (freeware): <https://www.fitswork.de/software/>