

# ExTra Nachweis ferner Gasriesen



Annalotta Hipp (15), Johanna Hipp (13) und Nicholas Dahlke (14)

HTG Lörrach  
Schülerforschungszentrum phænovum

Landesfinale BW 2021, Schüler experimentieren

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Transitmethode</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Analyse der Lichtkurve</b>	<b>2</b>
3.1	Parameter der Lichtkurve . . . . .	2
3.2	Berechnung des Planetenradius $R_p$ . . . . .	3
3.3	Berechnung des Abstands Stern-Planet $a$ . . . . .	4
3.4	Berechnung der Inklination $i$ . . . . .	4
3.5	Randverdunklung . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Simulation von Transits</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Transitmessung</b>	<b>8</b>
5.1	Ausstattung der Sternwarte . . . . .	8
5.2	Vorbereitung der Datenaufnahme . . . . .	8
5.3	Aufnahmen . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Erstellung einer Lichtkurve</b>	<b>9</b>
6.1	Die Lichtkurve . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Auswertung</b>	<b>11</b>
7.1	Auswertung per Hand . . . . .	11
7.2	Auswertung per <i>ETD</i> -Modell . . . . .	12
7.3	Diskussion . . . . .	13
7.4	Das Planetensystem von <i>Qatar 4</i> . . . . .	14
<b>8</b>	<b>Übersicht der Ergebnisse unserer Arbeit</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>15</b>
<b>10</b>	<b>Danksagung</b>	<b>15</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Venustransit [2] . . . . .	1
2	Exoplanetenmodell . . . . .	2
3	Photometermessung . . . . .	2
4	Vereinfachte Darstellung eines Exoplanetentransits und die dadurch erzeugte Lichtkurve mit ihren abzuleitenden Parametern [16], [22], [21] . . . . .	2
5	<b>Rot</b> : Informationen der Datenbanken [9]; <b>grün</b> : mit eigenen Messungen ermittelte Parameter; <b>blau</b> : Faktoren, die mit diesen Werten berechnet werden können; Verbindungslinien zeigen, welche Informationen nötig sind . . . . .	3
6	Transittiefen bei unterschiedlichen Planetenradien . . . . .	3
7	Darstellung verschiedener Inklinationen: <b>1</b> : Inklination von 70° <b>2</b> : Inklination von 80° <b>3</b> : Inklination von 90° . . . . .	4
8	Geometrie des Exoplaneten-Stern-Systems; von der Seite betrachtet . . . . .	5
9	Geometrie des Systems; Blickrichtung des Beobachters . . . . .	5
10	Geometrie des Systems; Blick aus Vogelperspektive . . . . .	5
11	Einfluss der Randverdunklung auf die Lichtkurve . . . . .	6
12	<i>POV-Ray</i> Simulation . . . . .	6
13	<i>POV-Ray</i> Script-file . . . . .	6
14	Simulation verschiedener Planetenradien . . . . .	7
15	Simulation verschiedener Planet-Stern Abstände . . . . .	7
16	Simulation verschiedener Inklinationen . . . . .	7
17	Das Teleskop . . . . .	8
18	Rohdatenbild von <i>Qatar 4</i> . . . . .	9
19	Anwendung der Aperturphotometrie auf zwei der Vergleichssterne und den Zielstern . . . . .	9
20	Lichtkurve von <i>Qatar 4b</i> erstellt mit <i>AstroimageJ</i> und gefittet mit dem physikalischen Modell der <i>ETD</i> ; Links: vergrößerte Darstellung der Lichtkurve; rote Punkte: Zielstern, grüne Punkte: Referenzsterne, blaue Punkte: korrigierte Werte des Zielsterns, gelbe Punkte: Abweichungen des Fits . . . . .	10
21	Lichtkurven von <i>Qatar 4b</i> - gemessen am <b>18.11.2020</b> und am <b>27.11.2020</b> . . . . .	11
22	links: Inklinationswert der <i>ETD</i> ; rechts: berechneter Inklinationswert . . . . .	13
23	Sonne und <i>Qatar 4</i> im Vergleich [23] . . . . .	14
24	Jupiter und <i>Qatar 4b</i> im Vergleich [23] . . . . .	14
25	Zusammenfassung der per <b>ETD-Modell</b> und per <b>Hand</b> ermittelten Ergebnisse . . . . .	15

## Tabellenverzeichnis

1	Transittiefen der Planeten unseres Sonnensystems, bei einem Radius der Sonne von 696340 km . . . . .	3
2	Notwendige Informationen aus der <b>gemessenen Lichtkurve</b> und der <b>Datenbank</b> [9] zur Berechnung des Planetenradius, des Abstands Stern-Planet und der Inklination . . . . .	11
3	Transitmitte, -dauer und -tiefe von <i>Qatar 4b</i> , errechnet mit dem Modell der <i>ETD</i> -Seite . . . . .	12
4	Mit Hilfe der <i>TRESCA</i> -Datenbank errechnete Parameter für <i>Qatar 4b</i> . . . . .	13
5	Vergleich der mit <b>ETD-Modell</b> , und <b>per Hand</b> berechneten Werte, sowie der Literaturwerte für <i>Qatar 4b</i> . . . . .	13

# 1 Einführung

Gibt es Leben außerhalb unseres Sonnensystems? Diese Frage haben sich Menschen schon lange gestellt, doch erst im Jahre 1995 wurde der erste Exoplanet - ein Planet, der um einen anderen Stern als die Sonne kreist - von den beiden Astrophysikern Michel Mayor und Didier Queloz entdeckt. Im Jahre 2019 erhielten sie hierfür den Physik-Nobelpreis. Seit 1995 hat sich das Forschungsfeld für Exoplaneten stark entwickelt. Jetzt, im Jahre 2021, sind bereits 4395 dieser extrasolaren Planeten bekannt [9].

Heutzutage können bereits Amateurastronomen nur mit Hilfe eines Teleskops, einer empfindlichen Kamera und eines PC's Exoplaneten nachweisen und Informationen über sie ermitteln. Dies ist auch das Ziel dieser Arbeit.

Für den Nachweis solcher Himmelskörper gibt es mehrere Methoden. Die erfolgreichste Technik, die auch hier benutzt werden soll, ist die Transitmethode. Im Gegensatz zur ebenfalls häufig angewendeten Radialgeschwindigkeitsmethode lässt sich mit der Transitmethode die Geometrie eines Exoplanetensystems ermitteln. Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit diesem Transitverfahren einige bekannte Exoplaneten nachzuweisen. Dabei sollen die Radien der Planeten, die Abstände zu ihren Sternen und die Neigungswinkel der Bahnen, die Inklinationen, ermittelt werden. Mit etwas Glück können durch dieses „Nachmessen“ auch sogenannte Transitzeitvariation detektiert werden. Diese Änderungen wären ein Hinweis auf zusätzliche Himmelskörper in den jeweiligen Systemen.

Im Folgenden soll zunächst genauer auf die Messung der Helligkeit, die Transitmethode und die Geometrie der sogenannten Lichtkurven eingegangen werden. Um dieses photometrische Verfahren verständlich zu machen, ist ein Exoplaneten-Modell gebaut worden. Mit Hilfe eines Raytracing-Verfahrens konnten einige Transit-Simulationen durchgeführt werden. Nachdem näher auf die astronomische Ausstattung der *sternwarte Gersbach* und die dort durchgeführten Aufnahmen eingegangen wurde, soll anhand des Exoplaneten *Qatar 4b* beispielhaft die Erstellung einer Lichtkurve erläutert werden. Schließlich kommen wir auf die Auswertung unserer Messungen und Berechnungen der Planetenradien, ihrer Abstände zu den Muttersternen und der Inklinationen zu sprechen. Die sowohl per Hand, als auch mit Hilfe einer aufwändigeren Analyse ermittelten Ergebnisse werden wir diskutieren. Den Schluss bilden ein kurzes Fazit und ein Ausblick auf mögliche weitere Schritte.

## 2 Transitmethode

Abends haben Sie doch bestimmt schon einmal eine Fliege vor einer Straßenlaterne vorbeifliegen sehen, oder? Dabei verdunkelt die Fliege ein wenig das ankommende Licht der Beleuchtung. Auf dieser Tatsache beruht auch die Transitmethode.

Bewegt sich ein Planet - die Fliege - von uns aus gesehen vor seinem Stern - der Straßenlampe -, findet ein sogenannter Transit statt. Diese Transits kann man auch innerhalb unseres Sonnensystems bei den Planeten Merkur und Venus beobachten. Beide Planeten befinden sich dabei während ihres Transits jeweils zwischen Erde und Sonne. Abbildung 1 zeigt den letzten von der Erde aus zu beobachtenden Venustransit im Jahre 2012. Bei Exoplaneten und ihren Sternen finden ebenfalls Transits statt. Auch hier muss der Planet genau zwischen Erde und seinem Mutterstern kreisen, damit auf der Erde der Transit beobachtet werden kann. Während des Transits verdeckt der Planet den Stern teilweise.

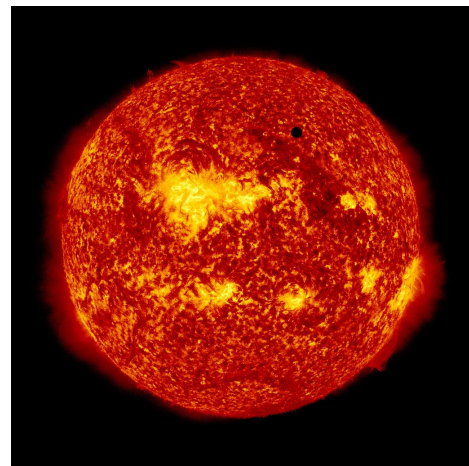


Abb. 1: Venustransit [2]

Startet man die Beobachtung eines Exoplaneten-Stern-Systems bereits kurz vor Beginn der Planetendurchquerung, so kann man mit einer Kamera die Veränderung der scheinbaren Helligkeit dieses Sterns messen. Die dabei auftretenden kleinen Änderungen der Lichtmenge werden dann in einer sogenannten Lichtkurve (s. Abbildung 4) dargestellt. In diesem Diagramm wird auf der horizontalen Achse die Zeit und auf der vertikalen Achse die gemessene Helligkeit aufgetragen. Der auftretende Helligkeitsabfall deutet auf das Vorhandensein eines Planeten hin.

Um das Prinzip eines Exoplanetentransits zu veranschaulichen, haben wir das in Abbildung 2 gezeigte Modell gebaut. Dazu montierten wir in einem ca. 80 cm großen Holzquader eine batteriebetriebene Kugellampe [5] (Radius 12,5 cm). Diese stellt den leuchtenden Mutterstern dar. Für den Exoplaneten haben wir eine Styroporkugel [4] (Radius 2,3 cm) verwendet. Dieser Planet kann nun mit Hilfe eines Motors [6] um die Lampe gedreht werden. Dabei lassen sich auch die Bahnneigung und der Abstand zum Stern variieren.

Die Lichtkurve (s. Abbildung 3) haben wir durch ein vor der Box montiertes Photometer [3], welches an das Messwertersfassungssystem Cassy [1] angeschlossen war, aufgenommen. Um Streulicht aus der Umgebung zu reduzieren, fanden die Messungen in einem völlig abgedunkelten Raum statt.

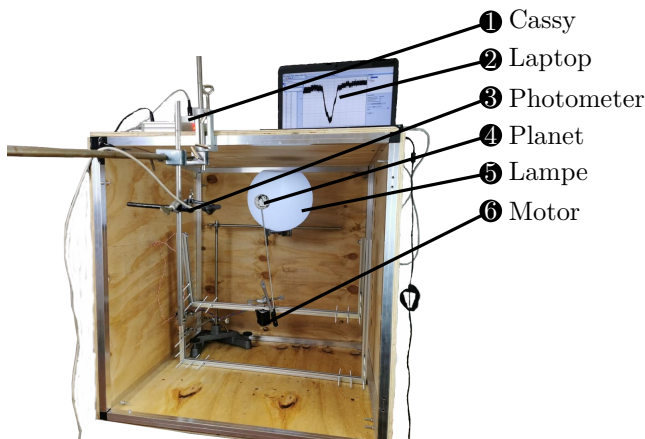


Abb. 2: Exoplanetenmodell

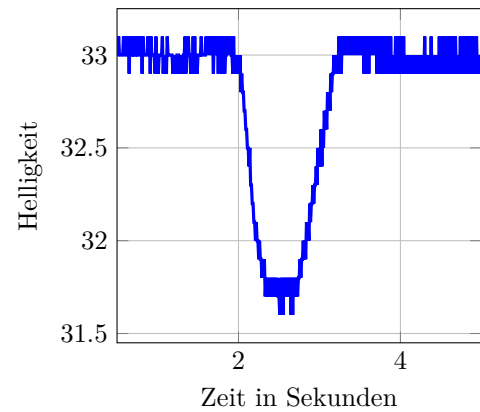


Abb. 3: Photometermessung

### 3 Analyse der Lichtkurve

#### 3.1 Parameter der Lichtkurve

Abbildung 4 zeigt schematisch die charakteristische Form einer Exoplaneten-Lichtkurve.

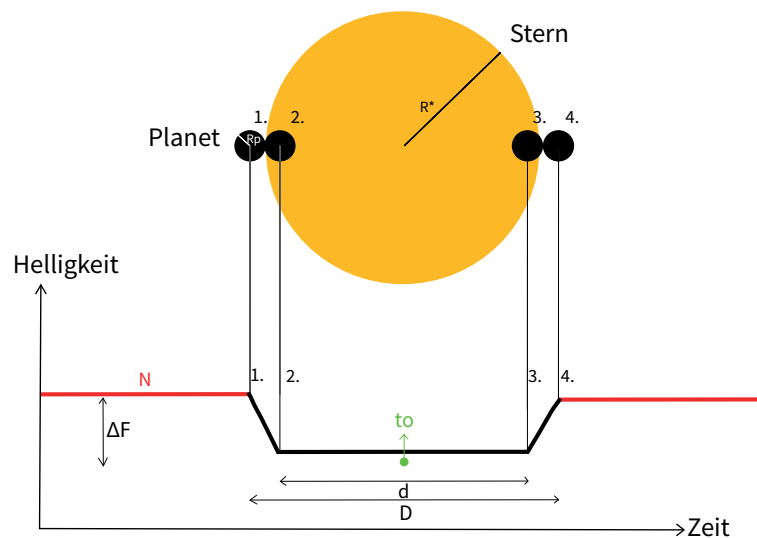


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung eines Exoplanetentransits und die dadurch erzeugte Lichtkurve mit ihren abzuleitenden Parametern [16], [22], [21]

Aus dieser Lichtkurve können einige Parameter direkt abgeleitet werden:

- die **Normalhelligkeit  $N$**
- die **Transitdauer  $D$** : die Zeit, die der Planet für den Transit braucht. Sie gilt ab dem ersten (1) und bis zum letzten Kontakt (4) des Sterns.
- die **Dauer der Totalität  $d$** : gibt ebenfalls die Dauer des Transits an; hier wird jedoch erst ab dem kompletten Eintritt (2) und bis vor Austritt (3) des Transits gemessen.
- die **Transitmitte  $t_0$**
- die **Transittiefe  $\Delta F$** : die Differenz zwischen der Normalhelligkeit des Sterns und der Helligkeit des Sterns während der Transitmitte.

Auch bei eigenen Messungen, können die oben genannten Parameter aus der Lichtkurve abgeleitet werden. Diese werden benötigt, um Planetenradius  $R_p$ , Abstand Stern-Planet  $a$  und Inklination  $i$  der Exoplaneten zu berechnen. Für die Auswertung werden einige zusätzliche Werte benötigt, die wir nicht selbst ermittelt haben. Diese wurden Datenbanken entnommen [9]. Abbildung 5 zeigt, welche Werte spektroskopischen Messungen anderer Beobachter entnommen wurden (rot) und welche Parameter wir selbst ermittelt haben (grün). Die blauen Kästen zeigen die Faktoren, die aus einem Zusammenspiel der Werte berechnet werden können. Welche Informationen für den jeweiligen Wert benötigt werden, veranschaulichen die Verbindungslinien.

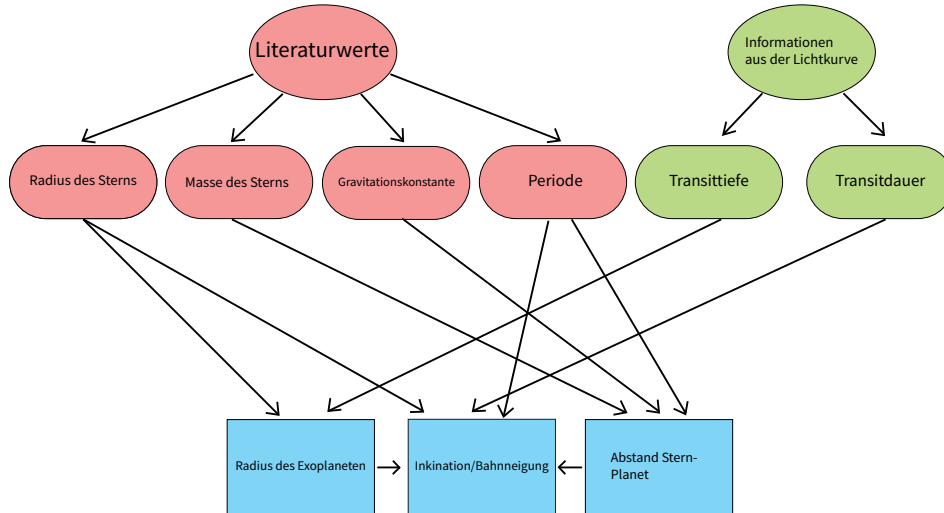


Abb. 5: **Rot**: Informationen der Datenbanken [9]; **grün**: mit eigenen Messungen ermittelte Parameter; **blau**: Faktoren, die mit diesen Werten berechnet werden können; Verbindungslinien zeigen, welche Informationen nötig sind

Im folgenden Kapitel wird die Berechnung des Planetenradius, des Abstands Stern-Planet und der Inklination mit Hilfe von Abbildung 5 genauer erläutert.

### 3.2 Berechnung des Planetenradius $R_p$

Unter der Annahme, dass der Stern über seine Oberfläche eine gleichmäßige Helligkeit hat, entspricht die Transittiefe  $\Delta F$  dem Flächenverhältnis von Planet und Stern.

Daher gilt:

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

Hierbei ist  $A_p$  die Fläche des Planeten,  $A_*$  die Fläche des Sterns,  $R_p$  der Radius des Planeten und  $R_*$  der Radius des Sterns. Vergrößert sich der Planetenradius, wird die Transittiefe größer. Vergrößert sich der Radius des Sterns, wird sie kleiner. Mit welcher Transittiefe sich nun rechnen lässt, verrät ein Blick in unser Sonnensystem [24].

Planet	Radius / km	Transittiefe / %
Merkur	2.439	0,0012
Venus	6.052	0,0076
Erde	6.378	0,0084
Mars	3.386	0,0024
Jupiter	69.170	1,01
Saturn	57.310	0,75
Uranus	25.270	0,135
Neptun	24.550	0,127

Tab. 1: Transittiefen der Planeten unseres Sonnensystems, bei einem Radius der Sonne von 696340 km

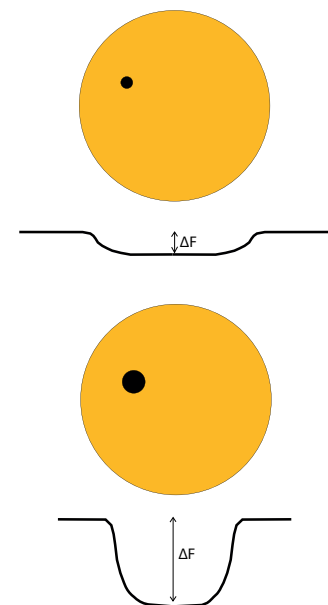


Abb. 6: Transittiefen bei unterschiedlichen Planetenradien

Die Transittiefen sind hierbei exemplarisch für einen fiktiven Beobachter außerhalb unseres Sonnensystems dargestellt. Die Werte der Tabelle zeigen, dass die Planeten unseres Sonnensystems nur einen sehr geringen Helligkeitsabfall verursachen. Die folglich hohe Anforderung an die Messtechnik ist unter anderem auch ein Grund dafür, dass Exoplaneten erst vor wenigen Jahren durch die Transitmethode entdeckt werden konnten.

Würden um einen gleichgroßen Stern nun zwei unterschiedlich große Exoplaneten kreisen, würde der größere Planet einen höheren Helligkeitsabfall verursachen (s. Abbildung 6). Durch Umformung ergibt sich aus Gleichung 1 der Planetenradius:

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

Wie Abbildung 5 zeigt, ist der Wert der Transittiefe  $\Delta F$  durch eigene Messungen bekannt, während der Radius des Muttersterns der Literatur entnommen wird.

### 3.3 Berechnung des Abstands Stern-Planet $a$

Zur Berechnung des Abstands zwischen Stern und Exoplanet kann das dritte Keplersche Gesetz verwendet werden:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_* + M_p)}{4\pi^2} \quad (3)$$

Dies ist eine Näherung mit kreisförmiger Umlaufbahn, wobei  $a$  der Abstand Stern-Planet,  $P$  die Umlaufzeit des Planeten um den Stern,  $G$  die Gravitationskonstante,  $M_*$  die Masse des Sterns und  $M_p$  die Masse des Planeten ist. Da die Masse des Planeten in Relation zur Masse des Sterns sehr gering ist, kann die Masse des Planeten  $M_p$  vernachlässigt werden. Somit ergibt sich für den Abstand  $a$  des Planeten:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_* \cdot P^2}{4\pi^2}} \quad (4)$$

Die Masse des Sterns  $M_*$  lässt sich durch die Methode der Spektralanalyse bestimmen. Wir entnehmen sie daher der Literatur. Die Umlaufzeit  $P$  ergibt sich nur aus eigenen Messungen, sofern die Transits des Exoplaneten mehrmals gemessen werden konnten. Da dies bei uns nicht möglich war, entnehmen wir sie ebenfalls der Literatur.

Meist wird der Abstand Stern-Planet in Vielfachen der Astronomischen Einheit (AE) angegeben. Hierbei entspricht eine AE dem Abstand zwischen Sonne und Erde, also 149.597.890 km.

Für einen von der Erde aus beobachteten Exoplaneten gilt: Je größer der Abstand Stern-Exoplanet  $a$ , desto kürzer die Transitdauer  $D$ . Der Grund liegt darin, dass der Planet aus Sicht des Betrachters mehr seiner Umlaufzeit vor dem Stern verbringt, wenn der Abstand klein ist.

### 3.4 Berechnung der Inklination $i$

Die Inklination ist die Bahnneigung eines Exoplaneten-Systems relativ zum Beobachter. In Abbildung 8 ist der entsprechende Inklinationswinkel  $i$  blau eingezeichnet.

Eine Inklination von  $i = 90^\circ$  bedeutet, dass der Exoplanet direkt in der Mitte seines Muttersterns vorbeizieht. Vergrößert oder verkleinert sich die Inklination, sieht es so aus, als würde der Planet weiter oben oder unten den Stern passieren. Da in diesem Fall der Transit viel kürzer dauert, hat die Bahnneigung einen direkten Einfluss auf die Transittiefe, aber auch auf die Transittiefe (s. Abbildung 7).

Es gibt bei Exoplaneten jedoch auch den Fall, dass die Bahnebene stark von  $90^\circ$  abweicht, oder nicht in Blickrichtung des Beobachters liegt. Dann verdeckt der Planet von uns aus gesehen seinen Mutterstern nicht und es können folglich auch keine Transits beobachtet werden.

Im Folgenden sollen die Inklination  $i$  und ihr Zusammenhang mit dem Breitengrad  $\delta$  bestimmt werden. Der Breitengrad wurde in Abbildung 8 als gelber Winkel  $\delta$  eingezeichnet.

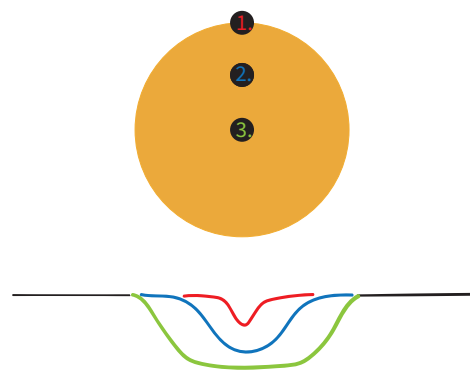


Abb. 7: Darstellung verschiedener Inklinationen:

- 1: Inklination von  $70^\circ$
- 2: Inklination von  $80^\circ$
- 3: Inklination von  $90^\circ$

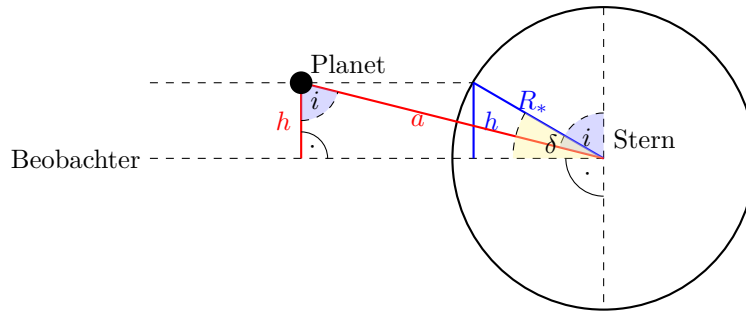


Abb. 8: Geometrie des Exoplaneten-Stern-Systems; von der Seite betrachtet

In Abbildung 8 sind Abstand Stern-Planet  $a$  und Sternradius  $R_*$  bekannt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, gilt:

$$\cos i = \frac{h}{a} \quad (5)$$

Hierbei ist jedoch die Strecke  $h$  unbekannt. Da im blauen Dreieck ein rechter Winkel vorhanden ist und der Sternradius  $R_*$  bekannt ist, ergibt sich:

$$\sin \delta = \frac{h}{R_*} \quad (6)$$

Dies kann umgeformt werden:

$$h = R_* \cdot \sin \delta \quad (7)$$

Daher erhält man:

$$\cos i = \frac{R_* \cdot \sin \delta}{a} \quad (8)$$

Um nun die Inklination  $i$  zu berechnen, fehlt jedoch immer noch der Wert für den Breitengrad  $\delta$ . Von Abbildung 9 ausgehend, kann die Länge  $l$  berechnet werden:

$$l = R_* \cdot \cos \delta + R_p \quad (9)$$

Die Länge  $l$  gibt die Hälfte des vom Exoplaneten überstrichenen Teil des Sterns an. Je größer  $l$ , desto größer die Transitdauer  $D$ .

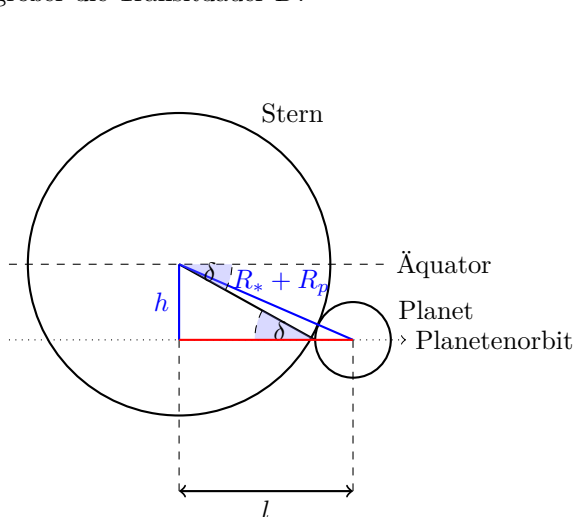


Abb. 9: Geometrie des Systems;  
Blickrichtung des Beobachters

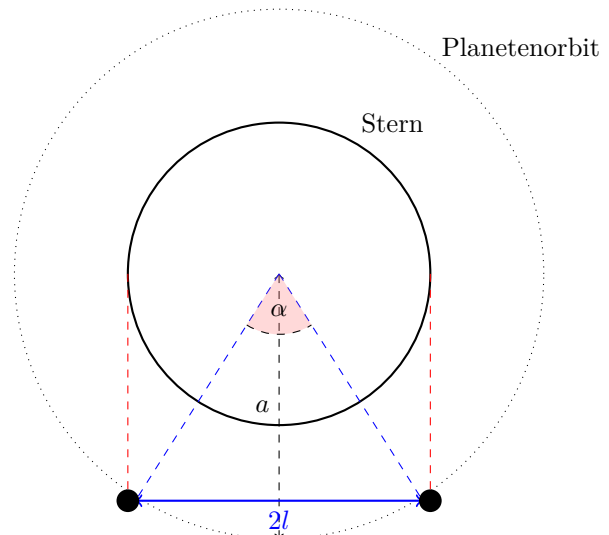


Abb. 10: Geometrie des Systems;  
Blick aus Vogelperspektive

Um  $l$  zu bestimmen, wird  $\alpha$  (der vom Exoplaneten überstrichene Winkel) im Bogenmaß benötigt. Für diesen gilt:

$$\alpha = \frac{2l}{a} \quad (10)$$



Da eine vollständige Umrundung im Bogenmaß  $2\pi$  entspricht und der Planet für diese Umrundung eine Zeit von  $P$  benötigt, gilt folgender Zusammenhang mit der Dauer des Transits  $D$ :

$$D = \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{2l}{a} = \frac{Pl}{\pi a} \quad (11)$$

Da  $P$ ,  $a$  und  $D$  bekannt sind, wird die Gleichung nach  $l$  aufgelöst:

$$l = \frac{D\pi a}{P} \quad (12)$$

Wird nun Gleichung 9 betrachtet, sieht man, dass  $\delta$  berechnet werden kann:

$$\delta = \arccos \frac{\frac{D \cdot \pi \cdot a}{P} - R_p}{R_*} \quad (13)$$

Nun sind alle Parameter für Gleichung 8 bekannt und die Inklination lässt sich berechnen. Als Grundlage dieser Herleitungen wurden die Artikel [4] und [16] verwendet.

### 3.5 Randverdunklung

Bisher sind wir davon ausgegangen, dass der Stern, um den sich der Exoplanet dreht, auf seiner Oberfläche eine gleichmäßige Helligkeit aufweist. Dies ist aber aufgrund eines Phänomens namens Randverdunklung nicht der Fall. Bei dieser Sterneigenschaft - welche auch bei der Sonne zu beobachten ist - nimmt die Helligkeit eines Sterns zum Rand hin ab. Sie tritt auf, da die Temperatur des Sterns mit der Tiefe zunimmt. In der Mitte der Sternscheibe sieht ein Beobachter die tiefsten und wärmsten Schichten, die das meiste Licht emittieren. Am Rand sind nur die oberen, kühleren Schichten zu beobachten, die weniger Licht abgeben.

Die Randverdunklung sorgt dafür, dass die Lichtkurven flachere *Flanken* bekommen (s. Abbildung 11).

Je stärker die Randverdunklung, desto V-Förmiger werden die Lichtkurven, je geringer die Randverdunklung, desto U-Förmiger werden sie. In Anbetracht dieser Tatsache stimmen unsere vorherigen Überlegungen zur Berechnung der Transittiefe und des Planetenradius nicht exakt. Trotzdem sind die zuvor erläuterten Formeln eine gute Näherung. Je nachdem, wie sich nun die Randverdunklung, die Inklination und das Größenverhältnis, sowie der Abstand von Stern und Planet ändern, entstehen unterschiedlich spitze, lange und tiefe Lichtkurven. Dies wurde sowohl durch Experimente mit dem im Verlauf dieser Arbeit gebauten Modell, als auch durch unsere *POV-Ray*-Simulationen bestätigt.

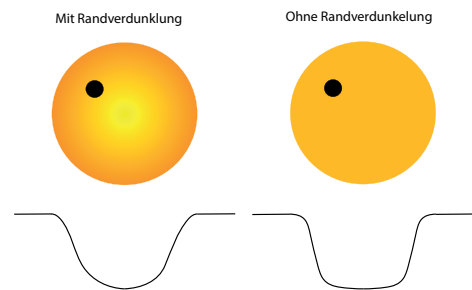


Abb. 11: Einfluss der Randverdunklung auf die Lichtkurve

## 4 Simulation von Transits

Transits lassen sich nicht nur durch Teleskope messen, sondern auch am Computer simulieren. Hierfür haben wir einen sogenannten RayTracer (*POV-Ray* [15]) verwendet. Als Grundlage für die Simulation wurden die Informationen aus [25] verwendet.

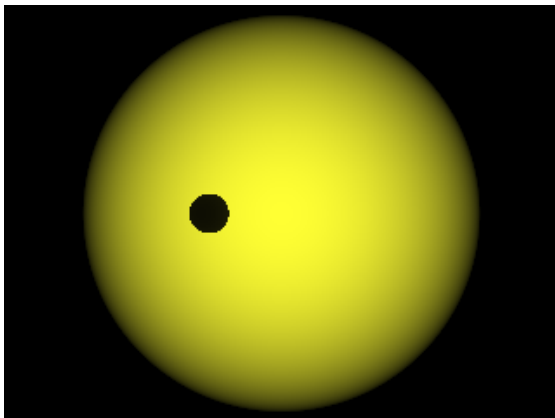


Abb. 12: *POV-Ray* Simulation

```
union {
  sphere{<0,0,0>, 5
  hollow
  pigment{rgbt 1}
  interior{media{emission <1.0,1.0,0.2>*0.1
  intervals 3
  samples 1,1 }}
  }
  sphere { 0, 0.5
  pigment {color rgb<0,0,0>}
  translate 12*z
  rotate 360*1.5*clock*y
  }
  rotate 0*z
  }
camera {location <8000,0,0>
look_at <0,0,0>
angle 0.1
}
```

Abb. 13: *POV-Ray* Script-file

Das Raytracing verfolgt hierbei den Weg von Lichtstrahlen in einer dreidimensional definierten, virtuellen Szene. So können realistisch wirkende Beleuchtungseffekte mit Schattenwurf, Spiegelungen etc. im Computer erzeugt werden. In Abbildung 12 ist ein von uns mit *POV-Ray* simulierter Transit zu sehen. Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt des dazugehörigen *POV-Ray* Skriptes. In diesem Skript werden Planet und Stern durch Kugeln definiert. Die Rotation des Planeten um den Stern wird mit mehreren Einzelbildern realisiert. Dazu wird der Planet jeweils ein kleines Stück weitergedreht und das entsprechende Bild abgespeichert. Die Helligkeit der Einzelbilder ergibt sich aus der Gesamtsumme aller Pixel. Da jeder der ca.  $10^5$  Pixel einen Helligkeitswert von 0 - 255 haben kann, entstehen in den simulierten Lichtkurven hohe Gesamthelligkeitswerte von ca.  $10^7$ .

In den von uns erstellten *POV-Ray*-Simulationen können nun folgende Parameter variiert werden: Planetenradius  $R_p$ , Sternradius  $R_*$ , Abstand Stern-Planet  $a$  und Inklination  $i$ . Der Simulationscode kann unter *Github* [10] heruntergeladen werden. Im Folgenden zeigen wir Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Planetenradien, Abständen und Inklinationen. Die entstehenden Lichtkurven werden in Diagrammen dargestellt, bei denen die x-Achse die jeweilige Bildnummer (entspricht der Zeit) und die y-Achse die Gesamthelligkeit angibt. Bei den Simulationen wurde stets nur ein Parameter verändert, während die anderen Werte konstant blieben.

Ein Parameter, der die Lichtkurve wesentlich beeinflusst ist das Verhältnis  $\frac{R_*}{R_p}$ . In Abbildung 14 kann man erkennen, dass der Helligkeitsabfall bei konstantem Sternradius um so größer wird, je größer der Planetenradius ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei einem größeren Planetenradius ein größerer Teil des Sterns bedeckt wird. Die Transitdauer hingegen wird nicht beeinflusst.

Mit den Simulationen lassen sich auch die Abstände Stern-Planet  $a$  variieren. Abbildung 15 zeigt das Ergebnis einer dieser Simulationen. Man erkennt, dass mit zunehmendem Abstand die Transitdauer sinkt, die Transittiefe jedoch gleich bleibt.

Auch unterschiedliche Inklinationen lassen sich mit *POV-Ray* simulieren. Abbildung 16 zeigt, dass sich in diesem Fall sowohl die Transitdauer, als auch die Transittiefe ändern. Je kleiner die Inklination, desto kürzer ist die Transitdauer und um so geringer ist der Helligkeitsabfall.

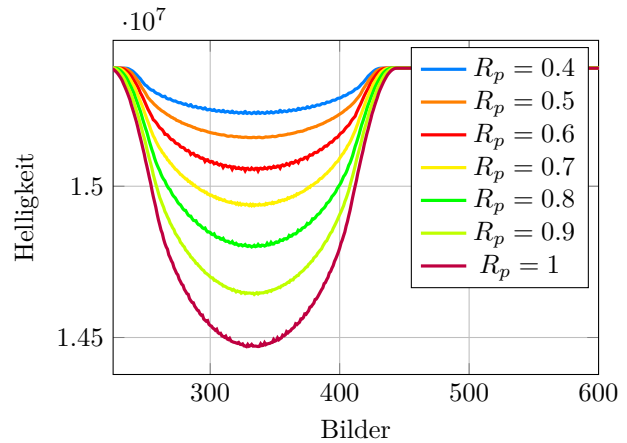


Abb. 14: Simulation verschiedener Planetenradien

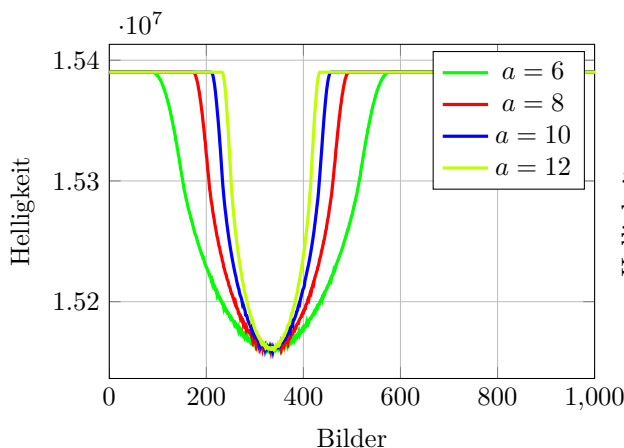


Abb. 15: Simulation verschiedener Planet-Stern Abstände

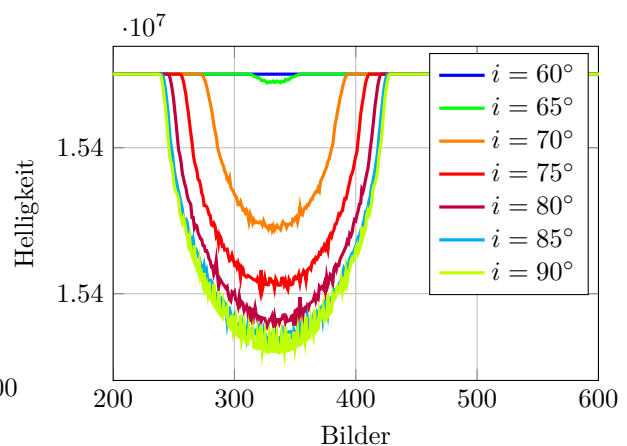


Abb. 16: Simulation verschiedener Inklinationen

## 5 Transitmessung

### 5.1 Ausstattung der Sternwarte

Um die Helligkeitsschwankungen der Exoplaneten-Sterne zu messen, haben wir die *phænovum*-Sternwarte Gersbach [19] genutzt. Das für die Beobachtungen verwendete Teleskop ist ein *Planewave CDK 17"* Spiegelteleskop (s. Abbildung 17). Es besitzt einen Spiegel mit einem Durchmesser von 43 cm und hat eine Brennweite von 2939 mm. Mit diesem Teleskop lassen sich gut lichtschwache Objekte wie Nebel, Galaxien, aber auch ferne Sterne mit Exoplaneten beobachten.

Es ist auf einer parallaktischen Montierung des Typs *10Micron GM 3000 HPS* montiert. Diese Montierung hat den Vorteil, dass sie die scheinbare Drehung des Himmels ausgleicht und daher eine präzise Nachführung des Sterns ermöglicht.

Die für die Aufnahmen genutzte Kamera ist eine *ZWO ASI 1600 MM Pro*. Es ist eine Schwarzweiß CMOS Kamera, da die Farben für unsere Anwendungen der Photometrie nicht wichtig sind. Die Kamera besitzt einen 12 Bit ADC (Analog to Digital Converter) und hat eine Auflösung von 4656 x 3520 Pixeln. Sie wird über die Software *ASIAIR* gesteuert.



Abb. 17: Das Teleskop

### 5.2 Vorbereitung der Datenaufnahme

Zur Auswahl eines Exoplaneten und einer passenden Beobachtungsnacht benutzen wir die Webseiten *Exoplanet Transit Database* (kurz: *ETD*) [8] und *Transit Finder* [20]. Nach Eingabe der geografischen Koordinaten der *sternwarte Gersbach* und eines Beobachtungszeitraums erhält man hier eine Liste von Exoplaneten-Kandidaten. Bei der Auswahl einer geeigneten Nacht, sollte man darauf achten, dass diese rund um Neumond liegt und die Wettervorhersage einen klaren Himmel prognostiziert. Bei der Wahl des Exoplaneten sollte man berücksichtigen, dass der Mutterstern eine scheinbare Helligkeit von mindestens 17 mag besitzt, da Sterne geringerer Helligkeiten mit dem CDK-Teleskop nicht beobachtet werden können. Zudem ist eine gewisse Mindesttransittiefe erforderlich, damit der Helligkeitsabfall gemessen werden kann. Ein weiteres Kriterium ist die sogenannte Airmass (Luftmasse). Diese gibt an, wie viel Atmosphäre das Licht durchquert, bevor es am Teleskop ankommt. Sie sollte möglichst gering und konstant über die Messung sein. Je höher der Stern am Himmel steht, desto geringer ist die zu durchquerende Airmass während des Transits.

Nachdem man sich für einen Exoplaneten entschieden hat, ist es hilfreich, von der *ETD*-Seite die Aufsuchskarte des Muttersterns auszudrucken. Diese Sternkarte hilft, den Mutterstern mit seinem Exoplaneten auf den Kameraaufnahmen zu identifizieren.

### 5.3 Aufnahmen

Wir haben insgesamt zehn Messungen von Exoplaneten durchgeführt. Die untersuchten Exoplaneten lauten: *HAT-P-51*, *HAT-P-37*, *HAT-P-53*, *HD189733b*, *HAT-P-19b*, *WASP-33b*, *Qatar-4b* und *HAT-P-32b*. Zu den extrasolaren Planeten *WASP-33b* und *Qatar-4b* haben wir jeweils zwei Messungen durchgeführt. Unsere qualitativ besten Messungen, die Lichtkurven von *HAT-P-32b* und *Qatar 4b*, haben wir zudem auf der *ETD*-Seite veröffentlicht [5]. Die Rohdaten dieser Aufnahmen können unter [17] heruntergeladen werden. Im Folgenden soll die Vorgehensweise bei der Datenaufnahme am Beispiel des Exoplaneten *Qatar 4b* etwas näher erläutert werden. Grund für die Auswahl dieses Exoplaneten ist, dass wir hier gleich zwei sehr gute Messungen erstellen konnten. Somit ist ein Vergleich der beiden Lichtkurven bei ein und dem selben Exoplaneten möglich. In gleicher Weise wurden die Daten für *HAT-P-32b* ausgewertet. Die Ergebnisse dieser drei Messungen werden in Kapitel 8 ausführlich dargestellt.

Zu Beginn starten wir das Teleskop. Das Teleskop und die Kamera sollten frühzeitig heruntergekühlt und die Zeiten des Computers, der Kamera und des Teleskops synchronisiert werden. Daraufhin wird das Programm *Stellarium* [18] geöffnet, mit dem das Teleskop gesteuert wird. Zunächst lassen wir das Teleskop einen hellen Stern anfahren. Somit kann überprüft werden, wie gut die Fokussierung des Teleskops ist. Nachdem die Einstellungen optimiert sind, wird das Teleskop auf den Stern des Exoplaneten geschwenkt. Da wir die scheinbare Helligkeit des Sterns, den Beginn und die Dauer des Transits kennen, kann die Belichtungsdauer, sowie die Anzahl der notwendigen Bilder vorab berechnet werden. Bevor die Aufnahmen gestartet werden, müssen wir die Belichtung überprüfen. Mit den Programmen *fitswork* beziehungsweise

*AstroArt*, wird kontrolliert, ob maximal 70 Prozent der Kamerasättigung (also ca. 50 000 ADUs im Falle der *ZWO ASI 1600 MM Pro*) vorhanden sind.

Grund hierfür ist, dass weder das Signal-Rausch-Verhältnis schlecht sein darf, noch es zu einer Überbelichtung der Aufnahmen kommen sollte.

Nach diesen Schritte wird ungefähr eine halbe Stunde vor Transitbeginn mit den Aufnahmen begonnen, damit die Lichtkurve auch die Normalhelligkeit des Sterns zeigt. Nach Ablauf des Transits und einer zusätzlichen halben Stunde, beenden wir die Aufnahmen. Da die Originalbilder (die sogenannten Lightframes oder Rohdaten) nicht ohne Fehler sind, ist es wichtig, zusätzlich sogenannte Dark- und Flatframes aufzunehmen. Diese korrigieren Rauschen, Vignettierungen oder auch Verschmutzungen auf der Kamera beziehungsweise auf dem Spiegel des Teleskops. Die Bilder (bei jedem Exoplaneten waren es ca. 150-250 Aufnahmen) sind dann bereit zur Auswertung.



Abb. 18: Rohdatenbild von *Qatar 4*

## 6 Erstellung einer Lichtkurve

Um aus den Rohdaten eine normierte Lichtkurve zu erhalten, benutzen wir das Computerprogramm *AstroimageJ* [1]. Mit diesem wird die Helligkeit des Zielsterns (hier *Qatar 4*) in jeder einzelnen Aufnahme relativ zu anderen Sternen berechnet. Hierfür werden zuerst die aufgenommenen Dark- und Flatframes per Median oder Durchschnitt zu einem Masterdark und einem Masterflat gemittelt. Die entstehenden Masterframes werden dann von den Lightframes abgezogen. Somit werden Störungen während der Aufnahmen minimiert.

Danach wird jedes Bild in absoluten Himmelskoordinaten, also in Rektaszension und Deklination, registriert und somit gleich ausgerichtet. Der Grund hierfür ist, dass die Bilder sich während der Aufnahmen ein wenig verschieben.

Nun kann man die scheinbare Helligkeit des Zielsterns (Stern mit Exoplanet) messen. Dafür benutzen wir eine Technik namens Aperturphotometrie, die darauf beruht, dass drei Kreisblenden um den Stern gelegt werden (s. Abbildung 19). Dabei wird aus dem innersten Ring die Summe der Pixel genommen und ein Hintergrundsignal aus der Summe der Pixel zwischen dem zweiten und dritten Ring abgezogen. Es ist wichtig, darauf zu achten, dass keine anderen Sterne in den Kreisblenden zu sehen sind und dass der innerste Ring alle Pixel des Sterns enthält. Um die Größe der Blende zu ermitteln, kann der Parameter Full-Width-at-Half-Maximum (kurz: FWHM) benutzt werden.

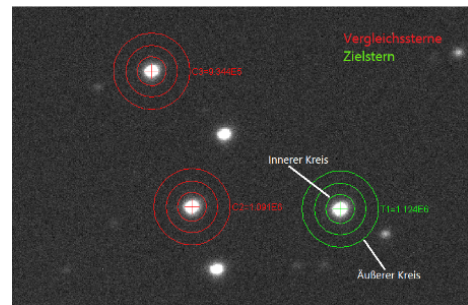


Abb. 19: Anwendung der Aperturphotometrie auf zwei der Vergleichssterne und den Zielstern

Hierbei misst man den Abstand zweier Punkte auf der Hälfte ihres maximalen Helligkeitswertes.

Nachdem die optimale Ringgröße ermittelt wurde, werden die Kreisblenden um den Zielstern und ähnlich helle, sogenannte Vergleichssterne (auch Referenzsterne), gelegt. Vergleichssterne sind Sterne in der Nähe des Zielsterns, bei denen die gleichen, auf der Atmosphäre beruhenden Helligkeitsschwankungen (zum Beispiel vorbeiziehende Wolken) stattfinden. Durch das Berücksichtigen der Referenzsterne werden diese Störungen ausgeglichen.

Alle Informationen werden in einem Textdokument gespeichert und können nun entweder direkt mit *AstroimageJ* oder einem anderen Programm weiterverarbeitet werden.

### 6.1 Die Lichtkurve

Abbildung 20 zeigt die Lichtkurve von *Qatar 4b*, die wir mit Hilfe von *AstroimageJ* erstellt haben. Die Aufnahmen stammen vom 27.11.2020. Die x-Achse zeigt die Zeit und die y-Achse die gemessene Helligkeit. Diese wird hier im sogenannten relativen normierten Strahlungsfluss angezeigt. Jeder Datenpunkt in dieser Abbildung entspricht einer gemessenen Helligkeit des Zielsterns beziehungsweise der Referenzsterne.

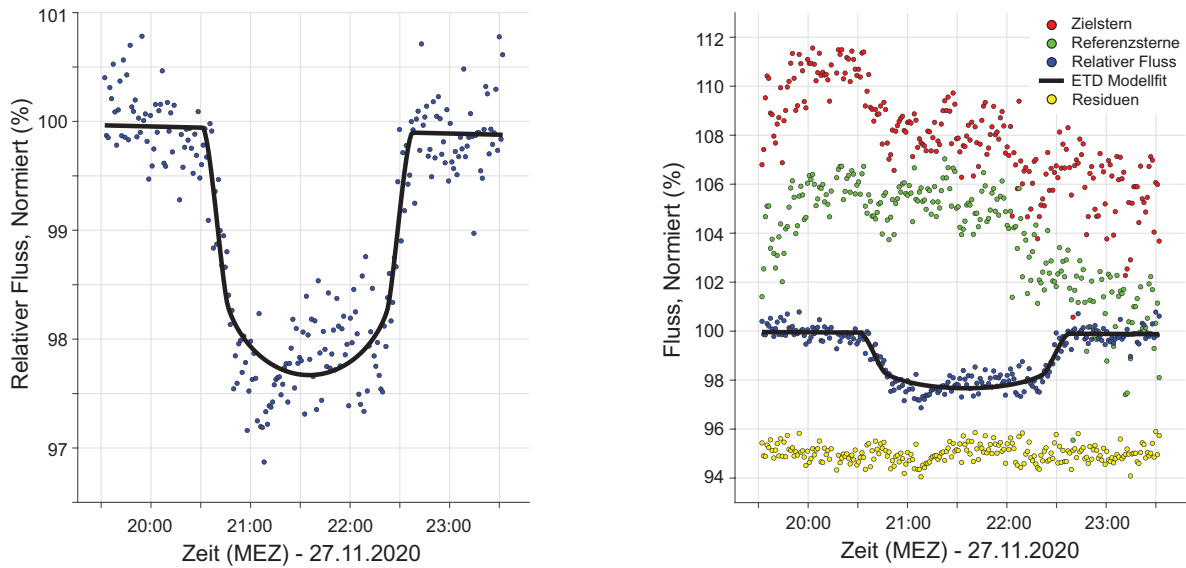


Abb. 20: Lichtkurve von *Qatar 4b* erstellt mit *AstroimageJ* und gefittet mit dem physikalischen Modell der *ETD*; Links: vergrößerte Darstellung der Lichtkurve; rote Punkte: Zielstern, grüne Punkte: Referenzsterne, blaue Punkte: korrigierte Werte des Zielsterns, gelbe Punkte: Abweichungen des Fits

Das linke Diagramm zeigt die normierte Lichtkurve von *Qatar 4b*. Es ist zunächst eine deutliche Helligkeitsabnahme und nach einer gewissen Zeitdauer wieder eine Zunahme zu erkennen: der Transit. Zusätzlich ist in schwarz der *Fit* des physikalischen *ETD*-Modells eingezeichnet.

Wie diese Lichtkurve entsteht, verdeutlicht das rechte Diagramm. Hierbei sind die roten Punkte die Helligkeiten des Zielsterns mit Exoplanet zu verschiedenen Zeitpunkten. Hier ist nicht direkt eine Kurve zu sehen. Vielmehr nimmt die Helligkeit mit fast jedem Datenpunkt ab. Dies liegt daran, dass der Stern bei den Aufnahmen fast im Zenit stand und mit der Zeit in Richtung Horizont wanderte. Folglich wurde die zu durchquerende Atmosphäre höher und das zur Kamera gelangende Licht sank. Dadurch verringert sich auch die Helligkeit.

Ein ähnliches Muster weisen die grünen Datenpunkte auf, die zu den gewählten Referenzsternen gehören. Sie zeigen den Durchschnitt der Helligkeiten aller Vergleichssterne.

Durch den Quotienten der grünen und roten Datenpunkte entfernt man die Störungen in der Erdatmosphäre und erhält die Werte der blauen Punkte. Diese stellen - wie auch die Datenpunkte der linken Abbildung - die Lichtkurve von *Qatar 4b* dar. Auch durch diesen deutlich zu sehenden Transit wurde ein *Fit* gelegt. Die Grundidee eines *Fits* besteht darin, die Messwerte in Form einer Funktion (der Lichtkurve) möglichst exakt zu beschreiben. Hierzu werden die Parameter der Funktion angepasst. Als Funktion für den Helligkeitsabfall wird auf der *ETD*-Seite die sogenannte *occultsmall* Routine verwendet ([7]). Diese wird in [13] näher beschrieben. Um den eigentlichen *Fit* durchzuführen, wird die nichtlineare Methode der kleinsten Quadrate benutzt. Dabei wird versucht, die Summe der Residuenquadrate möglichst klein zu halten. Das heißt, die Summe der Quadrate der Abweichungen wäre im idealen Fall null [24]. In Abbildung 20 sind die Abweichungen des Fits durch die gelben Datenpunkte dargestellt. Durch den *Fit* können außerdem einige Parameter, wie beispielsweise die Transiddauer oder Transittiefe, gewonnen werden.

Wir haben nun zwar eine gute Lichtkurve des Transits von *Qatar 4b* erstellt, es wäre jedoch besser, den Stern noch über mehrere Wochen zu beobachten. Erst bei einer Erstellung von mindestens drei Lichtkurven gilt ein Exoplaneten als nachgewiesen. Der Grund liegt darin, dass die Helligkeitsschwankungen auch durch andere Himmelsobjekte verursacht sein könnten. Da im Verlauf dieser Arbeit jedoch zwei Mal Messungen von *Qatar 4b* durchgeführt wurden und bei beiden Aufnahmen nahezu identische Lichtkurven entstanden sind (s. Abbildung 21), haben wir ein sehr gutes Ergebnis erzielt. Mit Hilfe der aus der Literatur entnommenen Umlaufzeit konnten wir zudem berechnen, dass etwa fünf Perioden zwischen unseren beiden Messungen vergangen sind. Unter zeitlicher Berücksichtigung dieser fünf Perioden haben wir dann die beiden Lichtkurven in Abbildung 21 übereinander gelegt. Vergleicht man diese beiden Lichtkurven, fällt auf, dass die abzulesende Transittiefe der Messung vom 18.11.2020 besser mit den Literaturwerten übereinstimmt als die Transittiefe vom 27.11.2020. Die gemessene Transiddauer stimmt hingegen am 27.11.2020 besser mit den Literaturwerten überein.

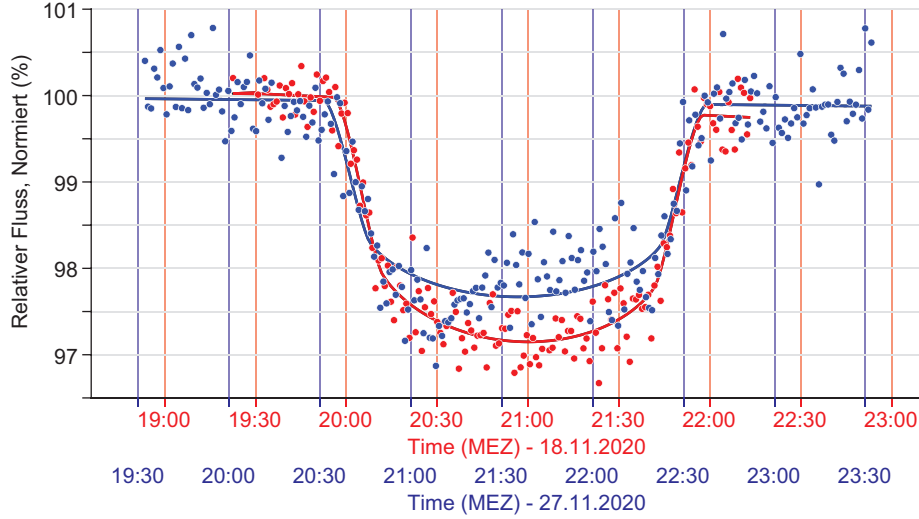


Abb. 21: Lichtkurven von Qatar 4b - gemessen am 18.11.2020 und am 27.11.2020

## 7 Auswertung

Als nächstes soll mehr über das System von *Qatar 4* in Erfahrung gebracht werden. Hierfür berechnen wir den Radius und die Inklination des Exoplaneten *Qatar 4b*, sowie den Abstand zu seinem Mutterstern. Diese Werte berechnen wir zum einen per Hand (anhand der in Kapitel 3 hergeleiteten Formeln) und zum anderen mithilfe des physikalischen Modells der *ETD*-Datenbank.

### 7.1 Auswertung per Hand

Aus der in Abbildung 20 gezeigten Lichtkurve von *Qatar 4b* (Aufnahmedatum: 27.11.2020) lassen sich die in Tabelle 2 angeführten grünen Werte direkt ablesen. In der Tabelle sind zusätzlich wichtige Datenbankwerte [9], die wir nicht selbst ermittelt haben, in rot eingetragen. Mit Hilfe dieser Werte können nun der Planetenradius, der Abstand Stern-Planet und die Inklination berechnet werden.

Parameter	Wert
Transitbeginn	20:32 Uhr
Transitende	22:40 Uhr
Transitmitte $t_0$	21:36 Uhr
Transitdauer $D$	128 min
Transittiefe $\Delta F$	0,023 (2,3%)
Umlaufzeit $P$	1,805 d (2599,2 min; 155952 s)
Sternradius $R_*$	$5,912 \cdot 10^8 m$ (0,849 $R_{Sun}$ )
Sternmasse $M_*$	$1,781 \cdot 10^{30} kg$ (0,896 $M_{Sun}$ )

Tab. 2: Notwendige Informationen aus der gemessenen Lichtkurve und der Datenbank [9] zur Berechnung des Planetenradius, des Abstands Stern-Planet und der Inklination

Zunächst soll der Radius des extrasolaren Planeten bestimmt werden. Für *Qatar 4b* beträgt dieser nach Gleichung 2:

$$R_p = 5,912 \cdot 10^8 m \sqrt{0.023} \approx 8,966 \cdot 10^7 m \quad (14)$$

Nun kann man den Radius von *Qatar 4b* auch in Vielfachen des Jupiterradius angeben. Dafür wird durch den Jupiterradius geteilt:

$$R_p = \frac{8,966 \cdot 10^7 m}{6,911 \cdot 10^7 m} \approx 1,297 \quad (15)$$

Der Planetenradius beträgt also  $1,297 \cdot R_{Jup}$ , womit *Qatar 4b* etwas etwas größer als Jupiter ist.

Der Abstand zum Stern des Exoplaneten lässt sich mit der in Kapitel 3 erläuterten Gleichung 4 berechnen:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_* \cdot P^2}{4 \cdot \pi^2}} \quad (16)$$

Die Periodendauer P muss dabei in der Einheit s angegeben werden. Mit den Literaturwerten ergibt sich:

$$a = \sqrt[3]{\frac{6,673 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 1,781 \cdot 10^{30} kg \cdot 155952^2 s^2}{4 \cdot 3,14^2}} \approx 4,185 \cdot 10^9 m \quad (17)$$

Nun lässt sich der Abstand Stern-Planet auch in Vielfachen der Astronomischen Einheit angeben:

$$a = \frac{4,185 \cdot 10^9 m}{1,496 \cdot 10^{11} m} \approx 0.0280 \quad (18)$$

*Qatar 4b* ist folglich zwar etwas größer als Jupiter, hat aber einen wesentlich kleineren Abstand zu seinem Mutterstern. Nach unseren Messungen ist der Abstand gerade einmal  $\frac{1}{10}$  der Entfernung Merkur-Sonne, bzw. 2,8% der Entfernung Erde-Sonne. Daher muss die Oberflächentemperatur auf *Qatar 4b* wesentlich höher sein, als auf Jupiter.

Um die Inklination  $i$  zu bestimmen, muss zunächst der Breitengrad  $\delta$  berechnet werden:

$$\delta = \arccos \frac{\frac{D \cdot \pi \cdot a}{P} - R_p}{R_*} \quad (19)$$

Um in diese Gleichung unsere Werte einzusetzen, muss darauf geachtet werden, dass sie die gleichen Einheiten haben. Die Periodendauer P und die Transiddauer D sind hier in Minuten angegeben.

$$\delta = \arccos \frac{\frac{128min \cdot 3,14 \cdot 4,185 \cdot 10^9 m}{2599,2min} - 8,966 \cdot 10^7 m}{5,912 \cdot 10^8 m} \approx 19,446^\circ \quad (20)$$

Nun erhält man für die Inklination:

$$i = \arccos \frac{5,912 \cdot 10^8 m \cdot \sin(19,4459^\circ)}{4,185 \cdot 10^9 m} \approx 87,3^\circ \quad (21)$$

Das System von *Qatar 4b* hat nach unseren Aufnahmen folglich eine Inklination von ca.  $87,3^\circ$ , womit wir etwas schräg auf das System gucken.

## 7.2 Auswertung per ETD-Modell

Die Tschechische Astronomische Gesellschaft betreibt nicht nur die ETD-Datenbank, sondern bietet auch die Möglichkeit an, die korrigierte Lichtkurve mit einem physikalischen Modell zu fitten [7]. Diese Analyse unterscheidet sich von unserer per-Hand-Analyse zum Beispiel darin, dass sie die Randverdunkelung berücksichtigt. Die Parameter, die gefittet werden, sind die Transitmitte, die Transiddauer und die Transittiefe. Mit diesen werden dann ebenfalls der Planetenradius und die Inklination berechnet. Man erhält zusätzlich Informationen über die Güte der eigenen Lichtkurve.

Tabelle 3 zeigt die von der ETD-Datenbank berechneten Werten für *Qatar 4b* bezüglich der Transitmitte, -dauer und -tiefe.

Mid transit - UTC:	2020-11-27 20:34:23	
Transit duration:	126.1 +/- 1.5	minut
Transit depth:	0.0247 +/- 0.0006	mag

Tab. 3: Transitmitte, -dauer und -tiefe von *Qatar 4b*, errechnet mit dem Modell der ETD-Seite

Dass diese Werte sehr gut mit den ermittelten Werten anderer Beobachter übereinstimmen, konnten wir an folgender Tatsache erkennen: Die *TRESCA*-Datenbank beurteilt die Güte einer Lichtkurve in fünf Kategorien - von „best“ bis „worst“. Zwei unserer auf dieser Seite hochgeladenen Lichtkurven wurden in die erstbeste und eine in die zweitbeste Kategorie eingeordnet.

Des weiteren wurden die berechneten Werte für die Parameter Planetenradius  $R_p$  und Inklination  $i$  angegeben.

$R_p$	1.552 +/- 0.057 $R_{Jup}$	$1.632^{+0.019}_{-0.020} R_{Jup}$
$R_*$	1.115 +/- 0.037 $R_{Sun}$	<i>fixed, errors included in i</i>
a	0.02861 +/- 0.00048 AU	<i>fixed, errors included in i</i>
U	1.8053704 days	<i>fixed</i>
i	88.2 +/- 1.2°	$81.76^{+0.14 0.96}_{-0.14 0.92} \circ$

Tab. 4: Mit Hilfe der *TRESCA*-Datenbank errechnete Parameter für *Qatar 4b*

Die linke Spalte von Tabelle 4 entspricht hierbei den Werten aus der Datenbank, während die rechte Spalte die errechneten Werte anhand unserer Messungen zeigt.

Wie zu sehen ist, wurden der Radius des Sterns  $R_*$ , der Abstand Stern-Planet a, und die Umlaufzeit P (hier U genannt) nicht berechnet, sondern als Hilfe zur Ermittlung der anderen Parameter verwendet. Das Ergebnis für den Planetenradius, ähnelt dem Wert der *ETD*-Datenbank sehr. Wenn man jedoch unsere ermittelte Inklination, mit der der *ETD*-Datenbank vergleicht, fällt auf, dass sich die Werte doch etwas unterscheiden. Die ermittelte Inklination beträgt ca. 81,76°; dagegen gibt die *ETD*-Datenbank einen Wert von 88,2° an. Dieser Unterschied klingt erstmals nicht sehr groß, doch wenn man ihn bildlich darstellt, fällt er auf (s. Abbildung 22).

Unsere Ergebnisse zu den extrasolaren Planeten *Qatar 4b* und *HAT-P-32b* können in der *TRESCA*-Datenbank unter [5] eingesehen werden. Die Ergebnisse unseres Beispiel Exoplaneten *Qatar 4b* sind unter [6] zu finden.

Mit den Veröffentlichungen unserer eigenen Daten, konnten nicht nur Informationen über das System der Exoplaneten gewonnen werden, sondern es konnte auch der professionellen Forschung und der Suche nach weiteren Exoplaneten im selben System geholfen werden (weiteres hier: [7]).



Abb. 22: links: Inklinationswert der *ETD*; rechts: berechneter Inklinationswert

### 7.3 Diskussion

Die mit *ETD*-Modell und per Hand berechneten Ergebnisse sowie die Literaturwerte für *Qatar 4b* stimmen nicht exakt überein. Deshalb soll nun kurz auf die Unterschiede eingegangen und Thesen zu den Abweichungen aufgestellt werden.

In Tabelle 5 sind die ermittelten Ergebnisse von *Qatar 4b* per *ETD-Modell* und per Hand nochmals im Vergleich aufgelistet. In der dritten Zeile dieser Tabelle sind zudem die Differenzen der beiden Berechnungsmethoden dargestellt. In der letzten Zeile können die Literaturwerte der *ETD*-Datenbank eingesehen werden.

	D	$t_0$	$\Delta F$	$R_p$	a	i
mit <i>ETD-Modell</i>	126 min	21:34 Uhr	2,47 %	1,63 $R_{Jup}$	-	81,8°
per Hand	128 min	21:36 Uhr	2,30 %	1,30 $R_{Jup}$	0,028 AE	87,3°
Differenz	2 min	2 min	0,17 %	0,33 $R_{Jup}$	-	5,5°
Literatur <i>ETD</i>	128 min	-	-	1,55 $R_{Jup}$	0,029 AE	88,8°

Tab. 5: Vergleich der mit *ETD-Modell*, und per Hand berechneten Werte, sowie der Literaturwerte für *Qatar 4b*

Bei Transitdauer D, Transitmitte  $t_0$  und Transittiefe  $\Delta F$  gibt es kaum Abweichungen. Bei dem Planetenradius  $R_p$  gibt es hingegen Unterschiede zwischen dem per Hand und dem per *ETD*-Modell berechneten Wert. Welches Ergebnis für den Planetenradius ermittelt wird, hängt von der Transittiefe und dem Radius des Sterns ab. Dabei liegt der per Hand ermittelte Wert für die Transittiefe sehr nahe an dem Wert des *ETD*-Modells. Der Grund für die Abweichungen ist daher vermutlich, dass die *ETD*-Datenbank für den Radius des Sterns einen Wert von 1.115 Sonnenradien annimmt, wohingegen wir einen Wert von 0.849 Sonnenradien angenommen haben. Vergrößert sich der Sonnenradius, folgt aus Gleichung 2 nämlich auch,



dass sich der Planetenradius vergrößert. Verglichen mit dem Literaturwert, liegen wir mit dem Ergebnis des physikalischen Modells der *ETD*-Datenbank näher an diesem.

Der Abstand Stern-Planet ist nicht über die *ETD*-Datenbank berechnet worden. Daher wurde auch kein Vergleich zu den per Hand ermittelten Werte vorgenommen. Vergleicht man den Literaturwert mit unserem Ergebnis, ist festzustellen, dass der berechnete Wert etwas unter der angenommen Entfernung liegt.

Die errechneten Werte zur Inklination unterscheiden sich mit einer Differenz von  $5,5^\circ$ . Dieser verhältnismäßig große Unterschied kommt vermutlich auch daher, dass die *ETD*-Datenbank andere Werte für die Systemparameter voraussetzt als andere Datenbanken. Die Werte der *ETD*-Datenbank für den Abstand Stern-Planet  $a$ , die Umlaufzeit  $P$  (bzw.  $U$ ) und den Planetenradius  $R_p$  weichen von unseren Werten ab. Somit ist es nicht überraschend, dass auch das Ergebnis ein anderes ist. Verglichen mit dem Wert aus der Literatur, ist der berechnete Wert per Hand genauer als der ermittelte Wert per *ETD*-Modell.

Bei allen Parametern können die Abweichungen auch daher kommen, dass das physikalische Modell der *ETD*-Datenbank die Randverdunklung mit berücksichtigt. In den in Kapitel 3 hergeleiteten Gleichungen wurde diese Randverdunklung hingegen nicht berücksichtigt.

Wichtig zu wissen ist, dass es verschiedene Quellen gibt, die Angaben zu den Parametern Transittiefe, Transitdauer, Planetenradius, Abstand Stern-Planet und Inklination machen. Auch diese Werte weichen häufig voneinander ab. Welche Werte *richtig* sind, ist also nicht abschließend geklärt. Insgesamt liegen unsere sowohl per Hand, als auch per *ETD*-Modell errechneten Werte nahe den Ergebnissen anderer Beobachter und sind daher sehr zufriedenstellend.

## 7.4 Das Planetensystem von *Qatar 4*

Nun konnten wir einige Informationen über das System von *Qatar 4b* ermitteln. Doch was genau verraten diese großen Zahlen uns jetzt eigentlich? In diesem Kapitel soll nun etwas näher auf die Interpretation der ermittelten Daten eingegangen und einige bildliche Vergleiche gegeben werden. Viele Informationen hierfür wurden aus eigenen Berechnungen entnommen. Einige entstammen jedoch auch anderen Quellen ([9], [23]).

Der Stern *Qatar 4* befindet sich oberhalb der Andromedakonstellation (RA: 00:19:26.0, DEC: +44:01:39) und ist ca. 1083 Lichtjahre von uns entfernt. Er ist ein sonnenähnlicher Stern - sowohl in seiner Masse, als auch in seiner Größe. In Abbildung 23 ist ein bildlicher Vergleich unserer Sonne mit *Qatar 4* zu sehen.

Um *Qatar 4* kreist der auch von uns beobachtete extrasolare Planet *Qatar 4b* mit einer Umlaufzeit von ca. 1,8 Tagen. Aus dieser kurzen Umlaufzeit lässt sich bereits schließen, dass er sich sehr nahe an seinem Stern befinden muss: es sind gerade einmal 0,028 AE. Im Vergleich: unser sonnennächster Planet Merkur, umkreist die Sonne in 88 Tagen, mit einer durchschnittlichen Entfernung von 0,4 AE. *Qatar 4b* „rast“ also in einem unglaublich schnellen Tempo um seinen Stern. *Qatar 4b* ist außerdem ein Gasriese, ein sogenannter *Heißer Jupiter*. Er ist etwas größer als Jupiter aber aufgrund seiner geringen Distanz zu seinem Stern, extrem heiß. Abbildung 24 stellt einen bildlichen Vergleich von Jupiter und *Qatar 4b* dar.

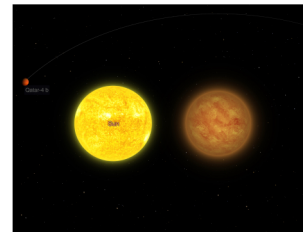


Abb. 23: Sonne und *Qatar 4* im Vergleich [23]

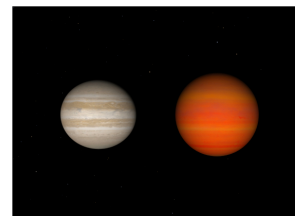


Abb. 24: Jupiter und *Qatar 4b* im Vergleich [23]

## 8 Übersicht der Ergebnisse unserer Arbeit

Da wir nicht nur eine Messung gemacht haben, sondern zehn, wollen wir hier nun kurz unsere Ergebnisse zusammenfassen. Aus drei von zehn Aufnahmen konnten wir sehr gute Lichtkurven erstellen. Mit diesen drei, auch auf *ETD*-Datenbank veröffentlichten Lichtkurven, gelang es uns die Exoplaneten *Qatar 4b* und *HAT-P-32b* nachzuweisen. So konnten wir sowohl per Hand, als auch per *ETD*-Modell die in Kapitel 3 hergeleiteten Parameter der Exoplaneten berechnen.

In Abbildung 25 ist eine Tabelle dargestellt, die unsere Ergebnisse für diese drei Aufnahmen zusammenfasst. Es sind der Name des extrasolaren Planeten, das Beobachtungsdatum und die erstellte Lichtkurve mit dem *ETD*-Modell abgebildet. Außerdem sind die ermittelten Parameter per *ETD*-Modell in orange und mit unseren Gleichungen ermittelten Werte in violett einzusehen.

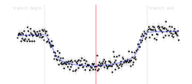
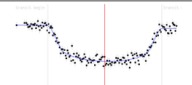
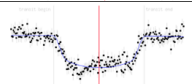
Exoplanet	Beobachtungsdatum	Lichtkurve	Parameter				
			Transitdauer	Transittiefe	Inklination	Radius Planet	Abstand Planet-Stern
HAT-P-32b	24.11.2020		183 min	0,0289 mag	86,89°	1,929 R <sub>Jup</sub>	0,0344 AE
			183min	0,0289 mag	83,9°	2,374 R <sub>Jup</sub>	
Qatar 4b	18.11.2020		121,7 min	0,03 mag	81,22°	1,797 R <sub>Jup</sub>	0,0280 AE
			120 min	0,028 mag	85,9°	1,431 R <sub>Jup</sub>	
Qatar 4b	27.11.2020		126.1 min	0.0247 mag	81,76°	1,632 R <sub>Jup</sub>	0,0280 AE
			128 min	0,023	87,3°	1,297 R <sub>Jup</sub>	

Abb. 25: Zusammenfassung der per *ETD-Modell* und per *Hand* ermittelten Ergebnisse

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel unseres Projekts haben wir erfolgreich realisiert. Zehn extrasolare Planeten konnten wir mit Hilfe der Transitmethode beobachten und zwei ferne Gasriesen nachweisen. Zudem haben wir für beide sehr gute Lichtkurven erstellt und aus diesen Informationen über die Planetensysteme berechnet.

Große Weltraumorganisationen wie die NASA können von amateurastronomischen Messungen wie unseren profitieren. Als Gesamtheit erlauben viele Einzelmessungen von Transits eine genauere Bestimmung der Periode und damit eine bessere Vorhersage künftiger Transits. Dies ist wichtig, um große Weltraumteleskope - die gerade mit dem Ziel, Exoplaneten detailliert zu untersuchen, in den Orbit gebracht werden -, optimal einsetzen zu können [11]. Auch unsere Messungen tragen zu der Verbesserung dieser Vorhersage bei: Bei einem Diagramm der *ETD*-Datenbank wurde jede einzelne Messung der Transitmitte - darunter auch unsere - aufgetragen. Dabei ist uns aufgefallen, dass relativ zur vorhersagten Transitmitte die berechneten Werte der Beobachter für die Transitmitte im Durchschnitt abnehmen. Daraus lässt sich folgern, dass diese noch nicht genau genug bestimmt wurde.

Ein anderer Grund hierfür könnte sein, dass es einen weiteren extrasolaren Planeten im selben System gibt. Weitere kleine Exoplaneten können sich nämlich dadurch verraten, dass sie den Transit eines größeren Exoplaneten (zum Beispiel in Dauer und Tiefe) systematisch verändern. Die Analyse unserer Messungen, gemeinsam mit denen anderer Amateurastronomen, könnte daher zur Entdeckung weiterer kleinerer - vielleicht sogar erdähnlicher - Planeten beitragen [12].

Schließlich lässt sich überlegen, welche weiteren Messungen und Untersuchungen lohnenswert sein könnten. Wir denken, dass es spannend wäre, noch mehr über das System der Exoplaneten in Erfahrung zu bringen. Alleine mit der Transitmethode ist dies jedoch nicht möglich, weshalb wir bisher einige Parameter aus Datenbanken entnommen haben. Um jedoch eigenständig mehr Informationen, wie Masse oder Atmosphäre des extrasolaren Planeten zu ermitteln, ist es notwendig, andere Methoden zu nutzen. Hier würden zum Beispiel andere Nachweismethoden, wie die Radialgeschwindigkeitsmethode, in Frage kommen. Aber auch mit weiteren spektroskopischen Messungen der Exoplaneten könnte man mehr über ihre chemische Zusammensetzung erfahren.

## 10 Danksagung

Ein riesiges Dankeschön gebührt unserem engagierten Projektbetreuer, Herrn Klein! Selbst unter Pandemiebedingungen fuhr er uns mehrfach nach Gersbach und half uns vor Ort die Messungen durchzuführen. Auch hat er unendlich viel Zeit und Mühe in die Betreuung unserer Arbeit investiert. Selbst über Themen unserer Arbeit hinaus, stand er uns stets für wertvolle und anregende Diskussionen zur Verfügung.

Außerdem danken wir Herrn Rätz von der Bundesdeutschen Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne [3], der uns bei unserer Arbeit mit seinen hilfreichen Tipps per E-Mail unterstützte. Bei Fragen oder wenn wir einmal nicht weiter kamen, konnten wir stets mit einer schnellen und aufschlussreichen Antwort rechnen.

Bei Herrn Gohn möchten wir uns dafür bedanken, dass er uns bei Problemen mit LaTeX weiter half.

Nur durch das *phænovum* [14] konnten wir unsere Messungen in der Sternwarte durchführen. Diesem Schülerforschungszentrum danken wir für die Erlaubnis, die Ausstattung der *stærnwarte Gersbach* [19] zu benutzen.

Zuletzt möchten wir uns bei unseren Familien für ihre motivierende Unterstützung und dem Lesen unserer Arbeit bedanken.

## Literatur

- [1] *AstroImageJ*. URL: <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>.
- [2] *Bild eines Venustransit*. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/SDO%27s\\_Ultra-high\\_Definition\\_View\\_of\\_2012\\_Venus\\_Transit\\_%28304\\_Angstrom\\_Full\\_Disc\\_02%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/SDO%27s_Ultra-high_Definition_View_of_2012_Venus_Transit_%28304_Angstrom_Full_Disc_02%29.jpg).
- [3] *Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft für veränderliche Sterne*. URL: <https://www.bav-astro.eu/index.php>.
- [4] Michael Cowley und Stephen Hughes. »Characterization of transiting exoplanets by way of differential photometry«. In: *Physics Education* 49.3, 293 (Mai 2014), S. 293. DOI: 10.1088/0031-9120/49/3/293. arXiv: 1509.01238 [physics.ed-ph].
- [5] *Ergebnisse*. URL: <http://var2.astro.cz/EN/tresca/transits.php?pozor=Nicholas+Dahlke%2C+Johanna+Hipp%2C+Annalotta+Hipp&submit=show>.
- [6] *Ergebnisse Qatar 4b*. URL: <http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1608542792&lang=en>.
- [7] *ETD Fit Prozedur*. URL: <http://var2.astro.cz/ETD/FitProcedureDescription-Pejcha2008.pdf>.
- [8] *Exoplanet Transit Database*. URL: <https://var2.astro.cz/ETD/>.
- [9] *Exoplaneten Katalog*. URL: <http://exoplanet.eu/catalog/>.
- [10] *Github*. URL: <https://github.com/nicholasdahlke/povray-transit-simulation>.
- [11] *Hilfe für NASA*. URL: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-watch/about-exoplanet-watch/overview/>.
- [12] *Kleinere Exoplaneten ETD*. URL: <http://var2.astro.cz/ETD/FitProcedureDescription-Pejcha2008.pdf>.
- [13] Kaisey Mandel und Eric Agol. »Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches«. In: *The Astrophysical Journal* 580.2 (Dez. 2002), S. L171–L175. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1086/345520. URL: <http://dx.doi.org/10.1086/345520>.
- [14] *phaenovum*. URL: <https://www.phaenovum.eu/>.
- [15] *POV-Ray*. URL: [www.povray.org](http://www.povray.org).
- [16] Stefanie Rätz. »Die Beobachtung von extrasolaren Planeten mit der Transitmethode«. In: *Astronomie+Raumfahrt* 48.6 (2011), S. 23–27.
- [17] *Rohdaten*. URL: <https://u.pcloud.link/publink/show?code=kZyprYXZRrbuxW6wwJj8771TRi51KzDB8MXX>.
- [18] *Stellarium*. URL: <https://stellarium.org/>.
- [19] *Sternwarte Gersbach*. URL: <https://staernwarten.de/>.
- [20] *Transit Finder*. URL: <https://astro.swarthmore.edu/transits/>.
- [21] *Transit Grafik*. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Andrew\\_Mao/publication/312524607/figure/fig1/AS:452176024739840@1484818573073/A-light-curve-showing-the-transit-method-of-detecting-exoplanets.png](https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Mao/publication/312524607/figure/fig1/AS:452176024739840@1484818573073/A-light-curve-showing-the-transit-method-of-detecting-exoplanets.png).
- [22] *Tu-Dresden*. URL: [https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipg/astro/ressourcen/dateien/misc/da\\_hofmann.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipg/astro/ressourcen/dateien/misc/da_hofmann.pdf?lang=de).
- [23] *Vergleiche von Qatar4/b*. URL: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/3487/qatar-4-b/>.
- [24] *Wikipedia Transitmethode*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>.
- [25] *WIS-2014-3MSOS-Lichtkurven simulieren*. URL: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/zentrales-wis-dokument-ms-os-3-2014/1224357>.