

ExTra - Nachweis ferner Gasriesen

Nicholas Dahlke (14), Annalotta Hipp (15) und Johanna Hipp (13)
 (phænovum Schülerforschungszentrum Lörrach-Dreiländereck e.V.)
 (stærnweite Gersbach)

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 - das 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 jeweiligen großen Halbachsen und die Neigungswinkel der Bahnen, die Inklinationen, ermittelt werden. Mit etwas Glück, können durch dieses „Nachmessen“ auch sogenannte Transitvariation 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 Stærnweite 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 großen Halbachsen 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.



Abb. 1: Stærnweite Gersbach [18]

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 2

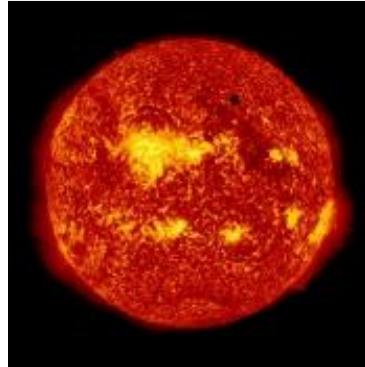


Abb. 2: Venustransit, gemeinfrei [2]

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.

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 5) 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 des Planeten hin.

Um das Prinzip eines Exoplanetentransits zu veranschaulichen, haben wir das in Abbildung 3 gezeigte Modell gebaut. Dazu haben wir in einem ca. 80 cm großen Holzquader eine batteriebetriebene Kugellampe [5] (Radius 12,5 cm) montiert. 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 lässt sich auch die Bahnneigung (Inklination) und die große Halbachse des Planeten variieren.

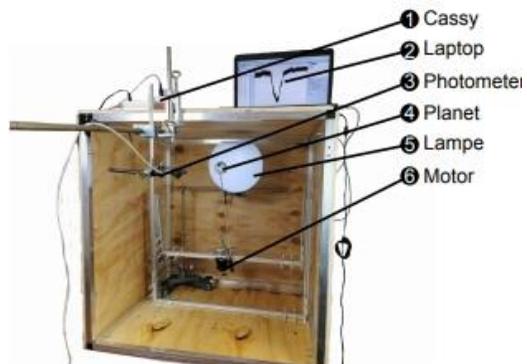


Abb. 3: Exoplanetenmodell

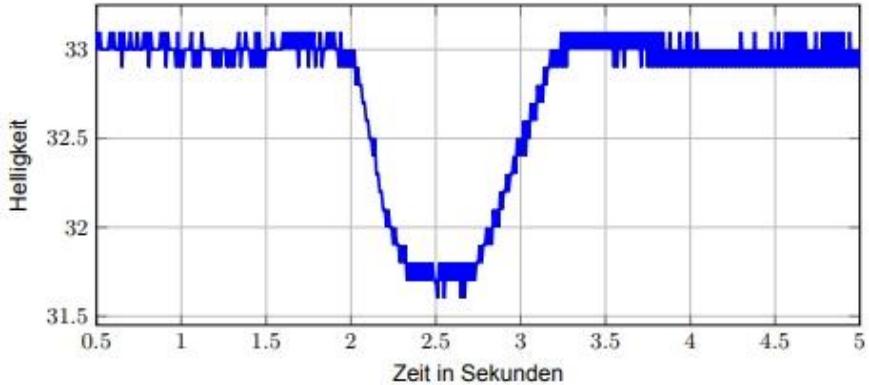


Abb. 4: Photometermessung

Die Lichtkurve (s. Abbildung 4) haben wir durch ein vor der Box montiertes Photometer [3], welches an das Messwerterfassungssystem Cassy [1] angeschlossen war, aufgenommen. Um Streulicht aus der Umgebung zu reduzieren, fanden die Messungen in einem völlig abgedunkelten Raum statt.

3 Analyse der Lichtkurve

3.1 Parameter der Lichtkurve

Abbildung 5 zeigt schematisch die charakteristische Form einer Exoplaneten-Lichtkurve.

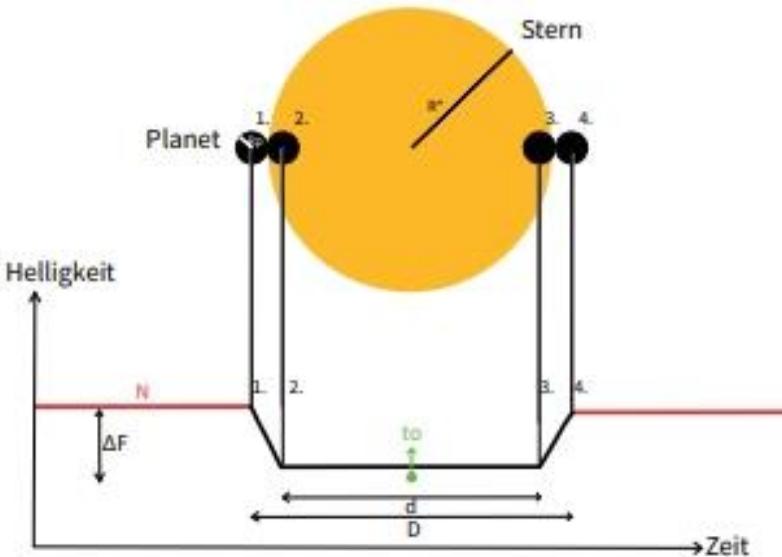


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung eines Exoplanetentransits und die dadurch erzeugte Lichtkurve mit ihren abzuleitenden Parametern [15], [21], [20]

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 ΔF** : 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 , große Halbachse 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 6 zeigt, welche Werte spektroskopischen Messungen anderer Beobachter entnommen wurden (hellgrau) und welche Parameter wir selbst ermittelt haben (grau). Die schwarzen Kästen zeigen die Faktoren, die aus einem Zusammenspiel der Werte berechnet werden können. Welche Informationen für den jeweiligen Wert benötigt werden, veranschaulichen die Verbindungslinien.

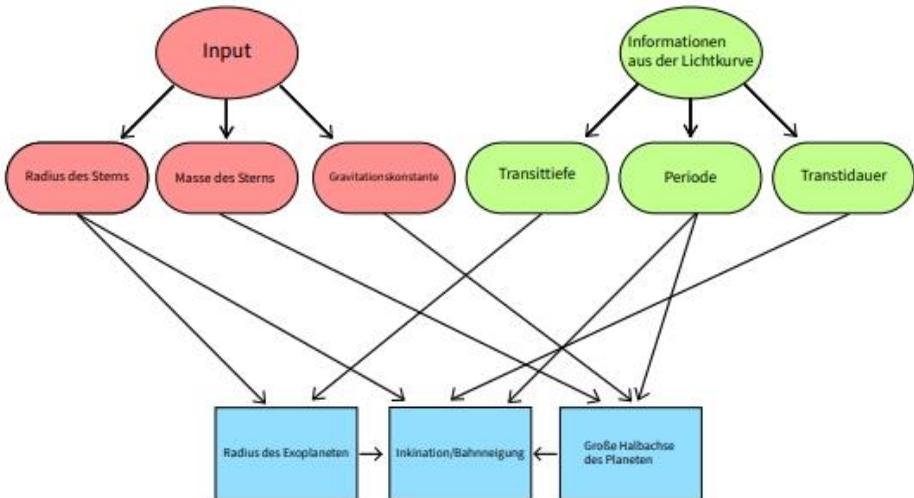


Abb. 6: Rot: Informationen der Datenbanken [9]; grün: mit eigenen Messungen ermittelte Parameter; blau: Faktoren, die mit diesen Werten berechnet werden können; Verbindungslinien zeigen, welche Informationen nötig sind

Im folgenden Kapitel wird die Berechnung des Planetenradius, der großen Halbachse und der Inklination mit Hilfe von Abbildung 6 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 ΔF dem Flächenverhältnis des Planeten und Sterns. 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 [23].

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

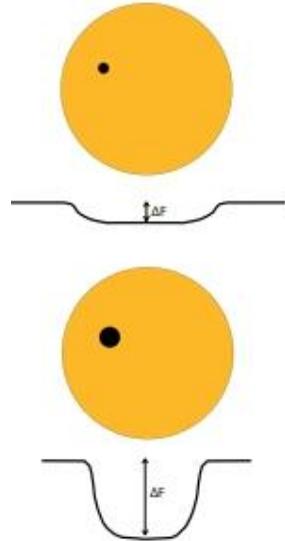


Abb. 7: Transittiefen bei unterschiedlichen Planetenradien

Tab. 1: Transittiefen der Planeten unseres Sonnensystems bei einem Radius der Sonne von 696.340 km

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 erst so spät Exoplaneten 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 7). Durch umformen ergibt sich aus Formel 1 der Planetenradius:

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

Wie Abbildung 6 zeigt, ist der Wert der Transittiefe ΔF durch eigene Messungen bekannt, während der Radius des Muttersterns der Literatur entnommen wird.

3.3 Bestimmung der großen Halbachse a

Zur Berechnung der großen Halbachse a - der größten Entfernung zwischen Stern und Planet - wird das dritte Keplersche Gesetz verwendet:

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

Dies ist eine Näherung mit kreisförmiger Umlaufbahn, wobei a die große Halbachse, 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. Aufgelöst nach a erhält man:

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

Die Masse des Sterns M_* lässt sich durch die Methode der Spektralanalyse bestimmen. Wir entnehmen ihn daher der Literatur. Die Umlaufzeit P ergibt sich aus Messungen, sofern die Transits des Exoplaneten mehrmals gemessen werden konnten. Meist wird die große Halbachse 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 die große Halbachse 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 die große Halbachse klein ist.

3.4 Berechnung der Inklination i

Die Inklination ist die Bahnneigung eines Exoplaneten relativ zum Beobachter. In Abbildung 9 ist der entsprechende Inklinationswinkel i blau gezeichnet. Eine Inklination von $i = 90^\circ$ bedeutet, dass der Exoplanet direkt in der Mitte des Sterns 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 Transittlänge, aber auch auf die Transittiefe (s. Abbildung 8).

Es gibt bei Exoplaneten jedoch auch den Fall, dass die Bahnebene stark von 90° 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.

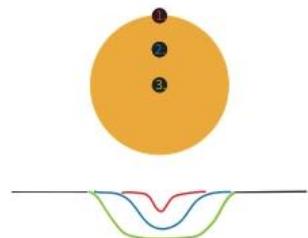


Abb. 8: Darstellung verschiedener Inklinationen
 1: Inklination von 70°
 2: Inklination von 80°
 3: Inklination von 90°

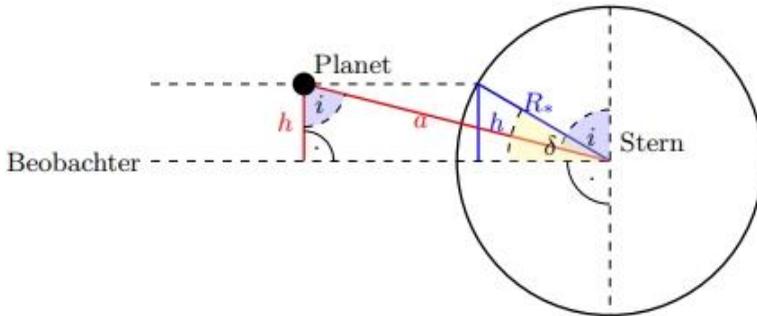


Abb. 9: Geometrie des Exoplaneten-Stern-Systems; von der Seite betrachtet

Im Folgenden soll die Inklination i und ihr Zusammenhang mit dem Breitengrad δ bestimmt werden.

Der Breitengrad wurde in Abbildung 9 als Winkel δ eingezeichnet. In Abbildung 9 sind große Halbachse 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 dunkelgrauen 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:

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

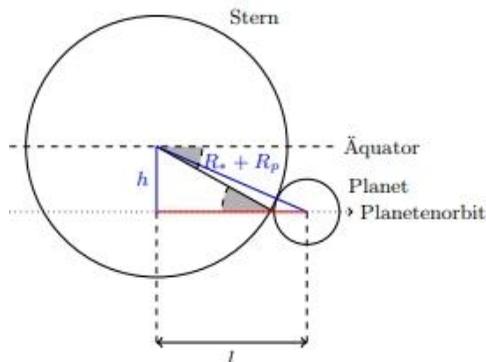


Abb. 10: Geometrie des Systems aus Blickrichtung des Beobachters

Um nun die Inklination i zu berechnen, fehlt jedoch immer noch der Wert für den Breitengrad δ . Von Abbildung 10 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 .

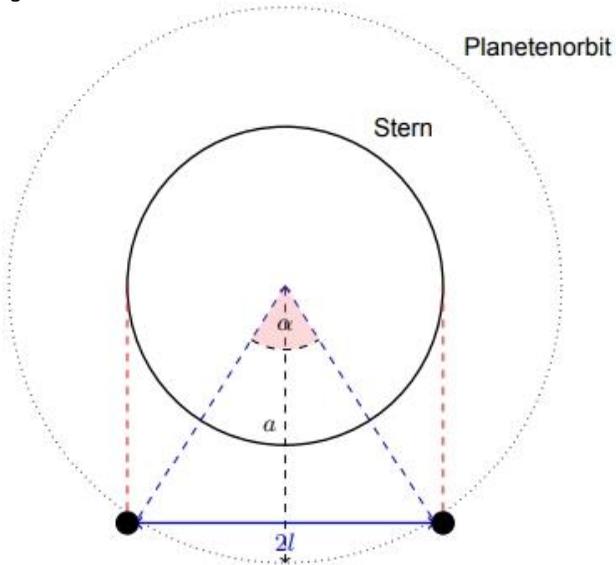


Abb. 11: Geometrie des Systems; Blick aus Vogelperspektive

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

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

Da eine vollständige Umrundung im Bogenmaß 2π entspricht und der Planet für diese Umrundung eine Zeit von P braucht, 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 δ berechnet werden kann:

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

Nun sind alle Parameter für Gleichung δ bekannt und die Inklination lässt sich berechnen. Als Grundlage dieser Herleitungen wurden die Artikel [4] und [15] 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 12).

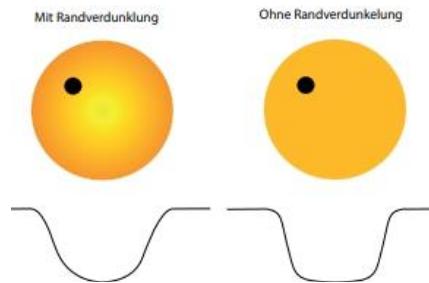


Abb. 12: Einfluss der Randverdunklung auf die Lichtkurve

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, das Größenverhältnis des Planeten und Sterns, die große Halbachse und die Inklination ändern, entstehen unterschiedlich spitze, lange und tiefe Lichtkurven. Dies wurde auch durch Experimente mit dem im Verlauf dieser Arbeit gebauten Modell, als auch durch die POV-Ray-Simulationen bestätigt.

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 [14]) verwendet. 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 13 ist ein von uns mit POV-Ray simulierter Transit zu sehen. Abbildung 14 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, kommen hohe Gesamthelligkeitswerte von ca. 107 in den simulierten Lichtkurven zustande.

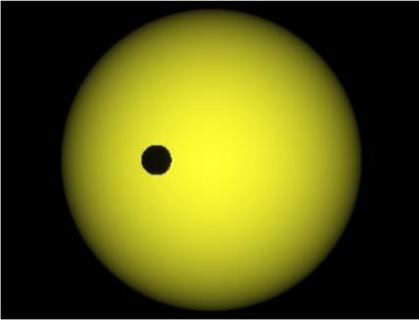


Abb. 13: POV-Ray Simulation

```

union {
  sphere{<0,0,0>, 5
  hollow
  pigment{rgb 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. 14: POV-Ray Script-file

In der POV-Ray-Simulation können nun folgende Parameter variiert werden: Planetenradius R_p , Sternradius R^* , große Halbachse a und Inklination i . Der Simulationscode kann unter Github [10] heruntergeladen werden. Im Folgenden zeigen wir Ergebnisse unterschiedlicher Simulationen mit verschiedenen Planetenradien, großen Halbachsen und Inklinationen. Die entstehenden Lichtkurven werden in Diagrammen angegeben, bei denen die x-Achse die jeweilige Bildnummer (repräsentiert die Zeit) und die y-Achse die Gesamthelligkeit angibt. Bei den Simulationen wurde immer nur ein Parameter verändert, während die anderen Werte konstant blieben.

Ein Parameter, der die Lichtkurve wesentlich beeinflusst, ist das Verhältnis R_p/R^* . In Abbildung 15 kann man erkennen, dass der Helligkeitsabfall bei konstantem Sternradius umso 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 Transiddauer hingegen wird nicht beeinflusst. Mit der Simulation lässt sich auch die Länge der großen Halbachse a variieren. Abbildung 16 zeigt das Ergebnis dieser Simulationen. Man erkennt, dass mit zunehmender Halbachse die Transiddauer sinkt, die Transittiefe sich jedoch nicht ändert. Auch unterschiedliche Inklinationen lassen sich mit POV-Ray simulieren. Abbildung 17 zeigt, dass sich in diesem Fall sowohl die Transiddauer als auch die Transittiefe ändern. Je kleiner die Inklination, desto kürzer ist die Transiddauer und umso geringer ist der Helligkeitsabfall.

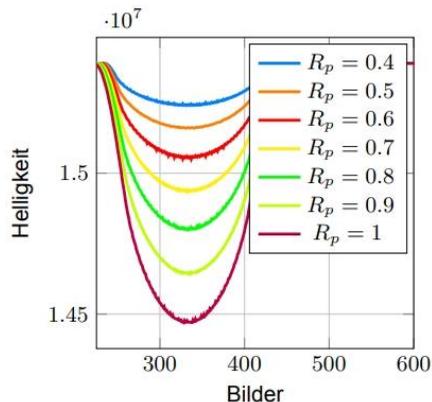


Abb. 15: Simulation verschiedener Planetenradien

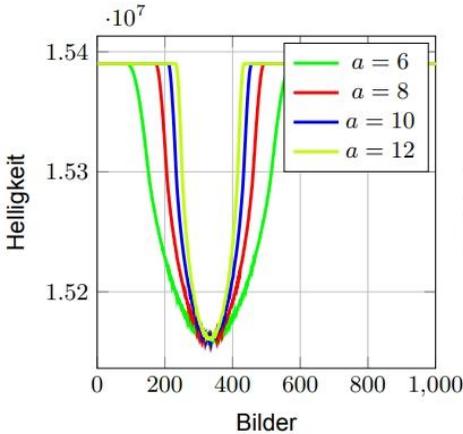


Abb. 16: Simulation verschiedener Halbachsen

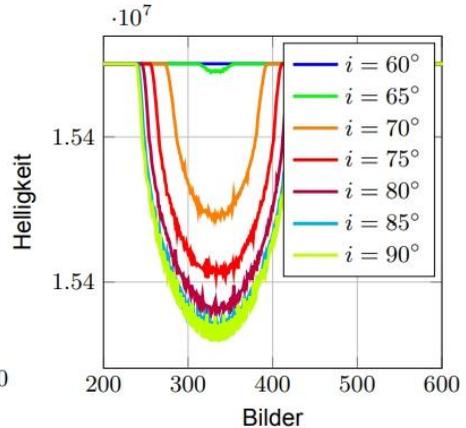


Abb. 17: Simulation verschiedener Inklinationen

5. Transitmessung

5.1 Ausstattung der Sternwarte

Um die Helligkeitsschwankungen der Exoplaneten-Sterne zu messen, haben wir die phänovum-Sternwarte Gersbach [18] genutzt. Das für die Beobachtungen verwendete Teleskop ist ein Planewave CDK 17" Spiegelteleskop (s. Abbildung 18). 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 eben auch ferne Sterne mit Exoplaneten beobachten. Es ist auf einer parallaktischen



Abb. 18: das Teleskop

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 AS/ 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 ASI AIR gesteuert.

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 [19]. 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 maximal eine scheinbare Helligkeit von 17 mag besitzt, da Sterne geringerer Helligkeiten mit dem CDK-Teleskop nicht beobachtet werden können. Zudem ist eine gewisse Mindesttransittiefe erforderlich, damit der Helligkeitsabfall überhaupt 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 heißen: 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 erfolgreichsten 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 [16] heruntergeladen werden. Im Folgenden soll die Vorgehensweise bei der Datenaufnahme am Beispiel des Exoplaneten Qatar 4b etwas näher erläutert werden. 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 [17] 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 dem Programm fitwork beziehungsweise AstroArt, wird kontrolliert, ob maximal 70 Prozent der Kamerasättigung (also ca. 50.000 ADUs im Falle der ZWO AS/ 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 Schritten 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, so genannte Dark- und Flatframes zu machen.



Abb. 19: Rohdatenbild von Qatar 4

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.

6. Erstellung einer Lichtkurve

Um aus den Rohdaten eine normierte Lichtkurve zu erhalten, benutzen wir das Computerprogramm AstroimageJ [1]. Mit diesem werden die Helligkeiten des Zielsterns (hier Qatar 4) 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 wird die scheinbare Helligkeit des Zielsterns (Stern und Exoplanet) gemessen. Dafür benutzen wir eine Technik namens Aperturphotometrie, die darauf beruht, dass drei Kreisblenden um den Stern gelegt werden (s. Abbildung 20). 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. Hierbei misst man den Abstand zweier Punkte auf der Hälfte ihres Maximal Helligkeitswertes. Nachdem die optimale Ringgröße ermittelt wurde, werden die Kreisblenden um den Zielstern und ähnlich helle, sogenannte Vergleichsterne (auch Referenzsterne) gelegt. Vergleichsterne 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.

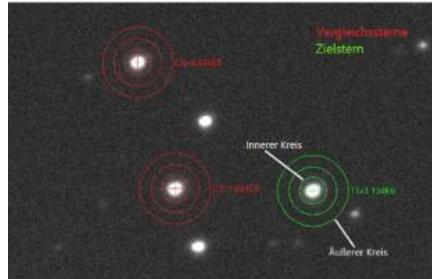


Abb. 20: Anwendung der Aperturphotometrie auf zwei der Vergleichsterne und einen Zielstern

6.1 Die Lichtkurve

Abbildung 21 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 Strahlungsfluss angezeigt. Jeder Datenpunkt in dieser Abbildung entspricht einer gemessenen Helligkeit des Zielsterns beziehungsweise der Referenzsterne.

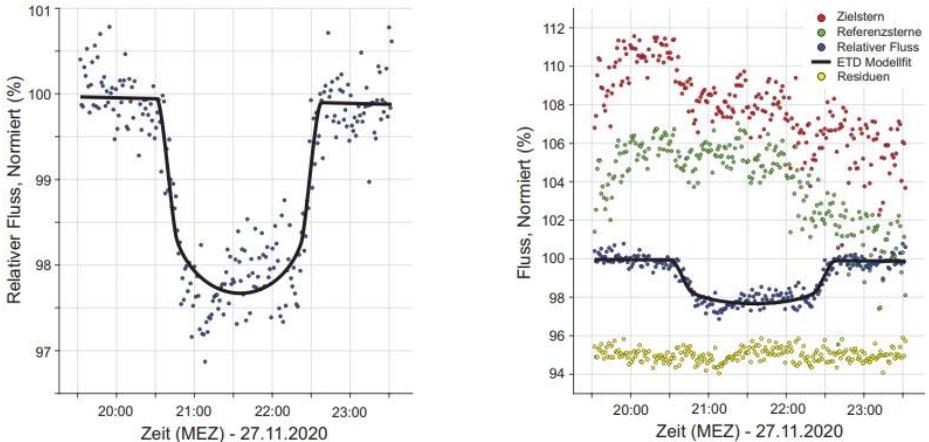


Abb. 21: Lichtkurve von Qatar 4b erstellt mit AstroimageJ und gefittet mit dem physikalischen Modell der ETD; Links: vergrößerte Darstellung der Lichtkurve; Rechts: 1. Punkte: Zielstern, 2. Punkte: Referenzsterne, 3. Punkte: korrigierte Werte des Zielsterns, 4. Punkte: Abweichungen des Fits

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 eines physikalischen ETD- Modells eingezeichnet.

Wie diese Lichtkurve entsteht, verdeutlicht das rechte Diagramm. Hierbei sind die ersten Punkte die Helligkeiten des Zielsterns und 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 gestartet ist und mit der Zeit in Richtung Horizont wanderte. Folglich wurde die zu durchquerende Atmosphäre höher und das zu uns gelangende Licht sank. Dadurch verringert sich auch die Helligkeit.

Ein ähnliches Muster weisen die zweiten Datenpunkte auf, die zu den gewählten Referenzsternen gehören. Sie zeigen den Durchschnitt der Helligkeiten aller Vergleichssterne. Durch Bildung des Quotienten der ersten und zweiten Datenpunkte, entfernt man die Störungen in der Erdatmosphäre und erhält die Werte der dritten Punkte. Diese stellen - wie auch die Datenpunkte der linken Abbildung - die Lichtkurve von Qatar 4b dar. Durch diesen deutlich sichtbaren Transit wurde auch ein Fit gelegt. Die übriggebliebenen Abweichungen des Fits werden von den vierten Punkten dargestellt.

Wir haben nun zwar eine gute Lichtkurve eines Transits von Qatar 4b erstellt, es wäre jedoch besser, den Stern noch über mehrere Wochen zu beobachten. Erst bei einer Beobachtung von mindestens drei Lichtkurven gilt die Existenz eines Exoplaneten als bewiesen. Der Grund hierfür ist, dass die Helligkeitsschwankungen auch durch andere Himmelsobjekte verursacht sein könnten.

Da im Verlauf dieser Arbeit jedoch zweimal Messungen von Qatar 4b durchgeführt wurden und bei beiden Aufnahmen nahezu identische Lichtkurven entstanden sind, (s. Abbildung 22) haben wir ein sehr gutes Ergebnis erzielt. Beide Messungen in Abbildung 22 entstanden mit einer Belichtungszeit von 60 s pro Einzelbild.

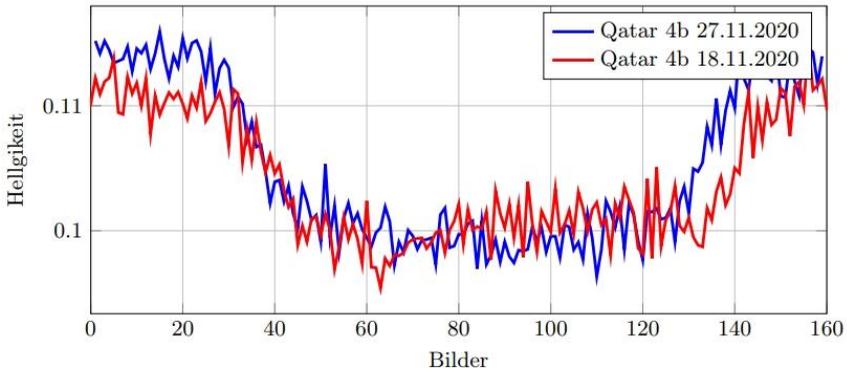


Abb. 22: Lichtkurven von Qatar 4b - gemessen in zwei verschiedenen Nächten

7. Auswertung

Als nächstes soll mehr über das System von Qatar 4 in Erfahrung gebracht werden. Hierfür berechnen wir den Planetenradius, die große Halbachse und die Inklination des Planeten Qatar 4b. Diese Werte berechnen wir einmal per Hand (anhand der in Kapitel 2 hergeleiteten Formeln) und zum anderen mithilfe eines physikalischen Modells der ETD-Datenbank.

7.1 Auswertung per Hand

Aus der in Abbildung 21 gezeigten Lichtkurve von Qatar 4b (Aufnahmedatum: 27.11.2021) lassen sich die in Tabelle 2 angeführten oberen Werte direkt ablesen. In der Tabelle sind zusätzlich wichtige Datenbankwerte [9], die wir nicht selbst ermittelt haben, unten eingetragen. Mit Hilfe dieser Werte können nun der Planetenradius, die große Halbachse und die Inklination berechnet werden.

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

Tab. 2: Notwendige Informationen aus der gemessenen Lichtkurve und der Datenbank [9] zur Berechnung des Planetenradius, der großen Halbachse und der Inklination

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

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

Nun kann man den Radius von Qatar 4b auch in Vielfachen des Jupiterradius angeben:

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

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

Die große Halbachse des Exoplaneten Qatar 4b lässt sich mit der in Kapitel 2 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 unseren Werten ergibt sich:

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

Um die große Halbachse in Vielfachen der Astronomischen Einheiten anzugeben, wird durch diese geteilt:

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

Schlussfolgerung: Qatar 4b ist zwar etwas größer als Jupiter, hat aber einen wesentlich kleineren Abstand zu seinem Mutterstern. Nach unseren Messungen ist der Abstand gerade einmal ein Zehntel 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 δ 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 Transitdauer D sind hier in Minuten angegeben.

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

Nun erhält man für die Inklination:

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

Das System von Qstar4b hat nach unseren Aufnahmen folglich eine Inklination von ca. 87,3°.

7.2 Auswertung per ETD

Die Tschechische Astronomische Gesellschaft betreibt nicht nur die E7D-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 Transitdauer 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 Werte 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 TRESKA-Datenbank beurteilt die Güte einer Lichtkurve in fünf Kategorien - von „best“ bis „worst“. Unsere drei auf diese Seite hochgeladenen Lichtkurven wurden jeweils in die zweitbeste Kategorie eingeordnet.

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

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

Tab. 4: Mit Hilfe der TRESKA-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_* , die große Halbachse 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 sehr unterscheiden. Die ermittelte

Inklination beträgt ca. $81,76^\circ$; dagegen gibt die ETD-Datenbank einen Wert von $88,2^\circ$ an. Dieser Unterschied klingt erstmals nicht sehr groß, doch wenn man ihn bildlich darstellt, fällt er deutlich auf (s. Abbildung 23).

Unsere Ergebnisse zu den extrasolaren Planeten Qatar 4b und HAT-P-32b können in der TRESKA-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 wird auch der professionellen Forschung und der Suche nach weiteren Exoplaneten im selben System geholfen (Weiteres hier: [7]).

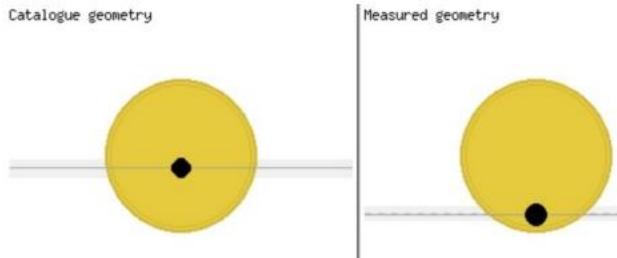


Abb. 23: Links: Inklinationswert der EDT
Rechts: berechneter Inklinationswert

7.3 Diskussion

Die Parameter der ETD-Datenbank und die Ergebnisse unserer Rechnungen 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 untersten Zeile sind zudem die Differenzen der beiden Berechnungsmethoden zu sehen.

	D	t_0	ΔF	R_p	a	i
mit ETD	126 min	21:34 Uhr	2,47 %	1,632 R_{Jup}	-	81,76°
per Hand	128 min	21:36 Uhr	2,3 %	1,297 R_{Jup}	0,02 AE	87,3°
Differenz	2 min	2 min	0,17 %	0,335 R_{Jup}	-	5,54°

Tab. 5: Vergleich der mit ETD und der per Hand berechneten Werte für Qatar 4b

Bei Transitdauer, Transitmitte und Transittiefe gibt es kaum Abweichungen, während die Abweichungen für den Planetenradius verhältnismäßig groß sind. Welches Ergebnis für den Planetenradius ermittelt wird, hängt von der Transittiefe und dem Radius des Sterns ab. Dabei liegt unser per Hand ermittelter Wert für die Transittiefe sehr nahe an dem Wert der ETD-Datenbank. 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 Formel 2 nämlich auch, dass sich der Planetenradius vergrößert.

Die große Halbachse ist nicht über die ETD-Datenbank ausgerechnet worden. Daher wurde auch kein Vergleich zu den per Hand ermittelten Werten vorgenommen. Vergleicht man die Ergebnisse anderer Beobachter (0,02861 AE [9]) mit unseren Ergebnissen, ist festzustellen, dass die berechneten Werte etwas unter der angenommenen Entfernung liegen.

Die errechneten Werte zu Inklination unterscheiden sich mit einer Differenz von 5,54°. 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 die große Halbachse a , die Umlaufzeit $P(U)$ und den Planetenradius R_p weichen von unseren Werten ab. Somit ist es nicht überraschend, dass auch das Ergebnis ein anderes ist. Verglichen mit den Werten aus der Literatur, ist der berechnete Wert per Hand genauer, als der ermittelte Wert per ETD. Bei allen Parametern können die Abweichungen auch daher rühren, dass das physikalische Modell der ETD-Datenbank die Randverdunklung mitberücksichtigt, während die Formeln, mit denen wir gerechnet haben, dies nicht tun.

Wichtig zu wissen ist, dass es verschiedene Quellen gibt, die Angaben zu den Parametern Transittiefe, Transitdauer, Planetenradius, große Halbachse 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 errechneten Werte nahe der Ergebnisse anderer Beobachter und sind sehr zufrieden- stellend.

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 werden und wir werden einige bildliche Vergleiche geben. Viele Informationen hierfür wurden aus eigenen Berechnungen entnommen. Einige entstammen jedoch auch anderen Quellen [9], [22]. 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 24 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. Daraus lässt sich schon schließen, dass er sich sehr nah an seinem Stern befinden muss: es sind nur 0,02803 AE. Im Vergleich: unser sonnennächster Planet Merkur umkreist die Sonne mit einer durchschnittlichen Entfernung von 0,403 AE in 88 Tagen. Qatar 4b rast also in einem unglaublich schnellen Tempo um seinen Stern. Qatar 4b ist ein Gasriese, ein sogenannter Heißer Jupiter. Er ist etwas größer als Jupiter, aber aufgrund seiner geringen Distanz zu seinem Stern extrem heiß. Abbildung 25 stellt den Vergleich von Jupiter und Qatar 4b bildlich dar.

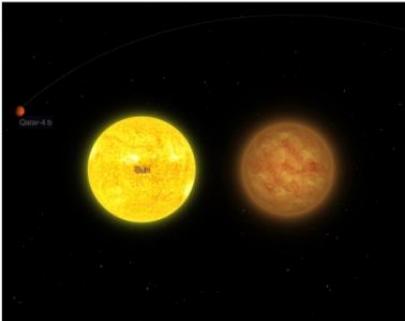


Abb. 24: Sonne und Qatar 4 im Vergleich [22]



Abb. 25: Jupiter und Qatar 4b im Vergleich [22]

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 haben wir eine auswertbare, komplette Lichtkurve erstellen können. Zwei der Aufnahmen wurden gemacht, um den Exoplaneten Qatar 4b nachzuweisen und eine Aufnahme galt dem Exoplaneten HAT-P-32b. Diese Aufnahmen haben sich als sehr gut erwiesen und wurden auf der TRESKA-Datenbank veröffentlicht.

In Abbildung 26 ist eine Tabelle zu sehen, die unsere Ergebnisse für die drei Aufnahmen zusammenfasst. Es sind sowohl der Name des extrasolaren Planeten und das Beobachtungsdatum, sowie die ermittelten Parameter per ETD-Modell zu sehen.

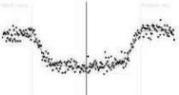
Exoplanet		<i>HAT-P-32b</i>	<i>Qatar_4b</i>	<i>Qatar_4b</i>
Beobachtungsdatum		24.11.2020	18.11.2020	27.11.2020
Lichtkurve				
Parameter	Transitdauer	183 min +/- 1,3	121,7 min +/- 0,9	126,1 min +/-1,5
	Transitmitte	24.11.2020 22:51:28 Uhr	18.11.2020 20:56:46 Uhr	27.11.2020 21:34:23 Uhr
	Transittiefe	0,0289 mag +/-0,0005	0,03 mag +/- 0,0006	0,0247 mag +/- 0,0006
	Inklination	86,89° +0,32 1,58/ -0,29 1,05	81,22° +0,08 0,86/ -0,08 0,85	81,76° +0,14 0,96/ -0,14 0,92
	Planetenradius	1,929 R _{Jup} +0,016/ -0,017	1,797 R _{Jup} +0,018/ -0,018	1,632 R _{Jup} +0,019/ -0,020

Abb. 26: Zusammenfassung der per ETD-Modell 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 unsere profitieren. Als Gesamtheit erlauben viele Einzelmessungen von Transits genauere Bestimmungen der Periode und damit eine bessere Vorhersage künftiger Transits. Dies ist wichtig, um große Weltraumteleskope – die gerade mit dem Ziel, Exoplaneten gezielt zu untersuchen, in den Orbit gebracht werden – optimal einsetzen zu können [11]. Außerdem können sich weitere kleine Exoplaneten 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 anderen spektroskopischen Messungen der Exoplaneten, könnte man mehr über seine chemische Zusammensetzung erfahren.

10. Danksagung

Unser Projektbetreuer Herr Klein fuhr mehrere Abende mit uns nach Gersbach und unterstützte uns bei der Auswertung unserer Daten sowie beim Verfassen unserer Arbeit. Auch in den Ferien war er bereit, uns per Videokonferenz über die Mathematik hinter der Transitkurve aufzuklären. Dafür möchten wir ihm ganz herzlich danken!

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 weiterkamen, 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 weiterhalf.

Nur durch das phænovum [13] konnten wir unsere Messungen an der Sternwarte durchführen. Diesem danken wir für die Erlaubnis, die Ausstattung der stærnwarte Gersbach [18] 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.
- [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] phaenovum. URL: <https://www.phaenovum.eu/>.
- [14] POV-Ray. URL: www.povray.org.
- [15] Stefanie Rätz. »Die Beobachtung von extrasolaren Planeten mit der Transitmethode«. In: *Astronomie+Raumfahrt* 48.6 (2011), S. 23–27.
- [16] Rohdaten. URL: <https://u.pcloud.link/publink/show?code=kZyprYXZRrbuxW6wwJj8771TRi51KzDB8MXX>.
- [17] Stellarium. URL: <https://stellarium.org/>.
- [18] Sternwarte Gersbach. URL: <https://staernwarten.de/>.
- [19] Transit Finder. URL: <https://astro.swarthmore.edu/transits/>.
- [20] 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.
- [21] Tu-Dresden. URL: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipg/astro/ressourcen/dateien/misc/da_hofmann.pdf?lang=de.
- [22] Vergleiche von Qatar4/b. URL: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/3487/qatar-4-b/>.
- [23] Wikipedia Transitmethode. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>.