

Das Humboldtgyrnasium in Kooperation mit dem
Schülerforschungszentrum Wuppertal am Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Projektbetreuer: Herr Bernd Koch

Arbeit im Rahmen des
Wettbewerbs Jugend forscht 2024
Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Bestimmung der Systemparameter des Exoplaneten Kepler-412 b mit Hilfe der Transitmethode

Exoplaneten in fernen Systemen

Projekt-ID #105595

Jonas Jacobs (18 Jahre)
Löhdorfer Straße 212
42699 Solingen
Jahrgangsstufe: Q2
jonas.jaco06@gmail.com

Abgabedatum:

14.01.2024

Kurzfassung

Diese Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der Berechnung und Überprüfung der Systemparameter des Exoplaneten Kepler-412 b und dessen Mutterstern. Dafür wird ein Transit von Kepler-412 b beobachtet und nach der Kalibrierung eine Lichtkurve erstellt. Daraufhin erfolgt die Auswertung des Datensatzes auf der Plattform Exoplanet Transit Database (ETD). Zusätzlich werden eigene Berechnungen mittels der Gesetze der Himmelsmechanik durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse im Hinblick auf die Messungen der professionellen Astronomie bewertet. In Forschungsarbeiten der Jahre 2018/2019 weichen einige Systemparameter gegenüber denen der Jahre 2014-2017 ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Werte für den Planetenradius. Diese Diskrepanzen werden in dieser Arbeit thematisiert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
1 Einleitung	1
2 Was sind Exoplaneten?	2
2.1 Die Entdeckung von Exoplaneten	2
2.1.1 Transitmethode	2
2.1.2 Radialgeschwindigkeitsmethode	3
2.1.3 Direkte Beobachtung	3
2.1.4 Astrometrie	4
2.1.5 Mikrolinseneffekt	4
3 Transitbestimmung des Exoplaneten Kepler-412 b	5
3.1 Forschungsziel	5
3.2 Der Exoplanet Kepler-412 b	5
3.3 Beobachtung des Transits	5
3.4 Erstellung der Lichtkurve	6
4 Eigene Forschung	8
4.1 Auswertung auf der Grundlage von ETD	8
4.1.1 Berechnung der Systemparameter; Planetenradius	8
4.1.2 Berechnung der Systemparameter; Bahnneigung	9
4.1.3 Berechnung der Systemparameter - Kreisbahnradius (Herleitung)	10
4.1.4 Berechnung des Planetenradius	11
4.2 Ergebnisse und Diskussion	11
4.2.1 Abweichungen von Systemparametern in Forschungsarbeiten	11
4.2.2 Berechnung des Planetenradius aus unterschiedlichen Quellen	12
4.2.3 Forschungsarbeiten der Astronomen und Berechnung von Systemparametern	13
5 Fazit	15
Abbildungs -, Tabellen -, Software - und Abkürzungsverzeichnis	16
Literatur	17
Danksagung und Selbstständigkeitserklärung	18

1 Einleitung

Der Mensch fragt sich seit der Antike, welchen Platz wir im Universum einnehmen. Das Weltbild veränderte sich im Laufe der Zeit und mit den Erkenntnissen, mit denen Wissenschaftler und Forscher versuchen unsere Welt zu erklären und zu verstehen. Der Mensch sieht sich als etwas Besonderes. Das wird spätestens dann deutlich, wenn man sich das alte geozentrische Weltbild anschaut. Die Menschen haben geglaubt, dass sie der Mittelpunkt des Universums seien. Heute wissen wir, dass wir nach dem heliozentrischen Weltbild nicht der Mittelpunkt in unserem Universum sind und denken dadurch unsere Welt ein bisschen besser verstanden zu haben.

Doch wenn man in der Wissenschaft eine Frage beantwortet, eröffnen sich damit neue, die man wieder versucht zu beantworten. Von Natur aus versuchen wir Menschen Antworten auf Fragen zu finden und unseren Forscherdrang zu befriedigen. Daraus stellt sich die Frage, wenn wir nicht der Mittelpunkt des Universums sind und das Universum etwas ist, was man als Mensch von der kleinen Erde nur schwer begreifen kann, sind wir trotzdem etwas Einzigartiges? Gibt es bei den hundert Milliarden Galaxien im Universum etwas wie uns? Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, suchen Forscherinnen und Forscher auf der ganzen Welt nach Antworten, indem sie nach anderen Planeten suchen. Denn es gibt Systeme in unserer Galaxie, in denen Planeten existieren, die sich von der Erde wahrscheinlich nicht groß unterscheiden.

Meine Motivation ist das Interesse an der Forschung und dem Verständnis unserer Welt. Darum beschäftige ich mich mit dem Thema der Exoplaneten, die in der Forschung antworten auf große Fragen liefern könnten. Wie zum Beispiel, ob es noch anderes Leben im Universum gibt. Nach den Möglichkeiten, die mir zur Verfügung stehen, freue ich mich, Forschung in diesem Bereich durchführen zu können. Denn ich habe mich gefragt, wie die Exoplaneten überhaupt entdeckt werden. Dafür werde ich nach einer kurzen Einführung in das Thema Exoplaneten (Kapitel 2) eine Methode zum Entdecken von Exoplaneten durchführen (Kapitel 3). Danach versuche ich weitere Fragen zu beantworten. Darunter auch die Frage, welchen Radius der Exoplanet hat? Diese Berechnung erfolgt im Kapitel 4.1.4.

Deshalb beschäftige ich mich in meiner Arbeit mit dem Nachweis des Exoplaneten Kepler-412 b mithilfe einer Beobachtung eines Transits (Kapitel 3). Daraufhin werde ich einige Systemparameter erläutern, indem ich Berechnungsmethoden vorstelle und durchführe (Kapitel 4.1), die zu einem besseren Verständnis des Systems beitragen sollen. Des Weiteren werde ich die Genauigkeit der Berechnung der Systemparameter aus den Transitdaten beurteilen und mit anderen Forschungsarbeiten vergleichen (Kapitel 4.2). Täglich werden neue Exoplaneten entdeckt, die auf ihre Systemparameter, wie ihre Größe untersucht werden müssen, damit eine erste Einordnung geschehen kann. Diese Einordnung werde ich an dem ausgewählten Exoplaneten durchführen und untersuche die Gewichtung von Diskrepanzen durch die Messungen (Kapitel 5).

Exoplaneten können bis heute noch nicht exakt abgebildet werden. Das bedeutet keiner weiß wirklich, wie der Planet aussieht. Doch gibt es sehr viele Illustrationen. Gerade das macht Exoplaneten zu sehr interessanten Objekten über die Medien oder andere Quellen. Durch Methoden wird davon ausgegangen, dass sie existieren, doch wirklich eine reale Darstellung von Exoplaneten gibt es nicht. Meine Arbeit kann einen kleinen Überblick über das geben, was bis jetzt in der Exoplaneten-Forschung möglich ist.

2 Was sind Exoplaneten?

Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, die an einen anderen Stern gebunden sind, nennt man extrasolare Planeten oder kürzer Exoplaneten. Exoplaneten können auf verschiedene Weise entdeckt und nachgewiesen werden, dass sie existieren. Schon alte griechische Philosophen vor 2500 Jahren haben sich Gedanken darüber gemacht, ob es noch andere Welten gibt und vermutet, dass die Erde nicht einzigartig ist. Die Meinungen und Vermutungen waren verschieden:

„Es gibt unendlich viele Welten, welche die unserer Welt ähnlich sind, aber auch andere, die ganz anders sind.“ (Epicurus, 341-270 v.Chr.)

„Es kann nicht mehr als eine Welt geben.“ (Aristoteles, 384-322 v.Chr.)

Doch dann hat es viele Jahre gedauert, bis diese Welten wirklich entdeckt wurden. Der Grund dafür ist, dass es sehr schwierig ist, Exoplaneten zu entdecken. Das liegt an der Distanz, die diese fernen Systeme von uns entfernt sind. Der erdnächste Planet außerhalb unseres Systems ist Proxima Centauri b und ist etwa 4,2 Lichtjahre entfernt. Das ist eine Distanz, die nicht einfach so mit einem Teleskop überwunden werden kann. Dafür benötigt man andere Methoden, um einen Planeten nachzuweisen, der um einen Stern kreist (Winn 2023). Deshalb gelang der erste Nachweis eines Planeten um einen sonnenähnlichen Stern erst den Astronomen Major und Queloz im Jahr 1995. Die Methode, die verwendet wurde, nennt man die Radialgeschwindigkeitsmethode. Eine weitere Methode ist die Transitmethode. Die Methoden zur Entdeckung und zum Nachweisen eines Exoplaneten werden in folgendem Kapitel einmal genauer vorgestellt (Kapitel 2.1).

2.1 Die Entdeckung von Exoplaneten

Exoplaneten können auf verschiedene Weisen entdeckt werden. Im Folgenden werden einmal die wichtigsten Methoden zum Entdecken von Exoplaneten mit Vor- und Nachteilen kurz vorgestellt. Die Transitmethode steht dabei im Vordergrund, da diese Methode in der Arbeit zum Untersuchen und Erforschen des Exoplaneten Kepler-412 b verwendet wurde. Außerdem ist die Transitmethode die Methode, mit denen die meisten Exoplaneten nachgewiesen wurden. Darauf folgt die Radialgeschwindigkeitsmethode, weshalb diese beiden Methoden die wichtigsten Werkzeuge bei der Exoplaneten Untersuchung sind. Doch auch noch anderen Methoden werden verwendet und wie man sieht, haben alle gewisse Ähnlichkeiten zueinander.

2.1.1 Transitmethode

Das Kepler-Teleskop, welches im Jahr 2007 mit Beobachtungen angefangen hat, hat über 2000 Exoplaneten durch die Transitmethode entdeckt und noch mehr mögliche Kandidaten identifiziert. (Perryman 2018) Durch die Transitmethode wurden so insgesamt bis 2023 über 4140 Exoplaneten entdeckt. Diese Methode stellt sich als äußerst nützlich dar, da sie die Verdunklung misst, wenn der Exoplanet vor den Mutterstern tritt (Abb. 2.1) und dadurch eine effiziente Suche nach Exoplaneten ermöglicht. Die vorliegende Abbildung (2.1) stellt auch ein Problem oder Einschränkung der Transitmethode dar. Zum einen muss die Inklination der Umlaufbahn um den Stern nahe bei 90° liegen, um von der Erde aus einen Transit zu beobachten. Außerdem können

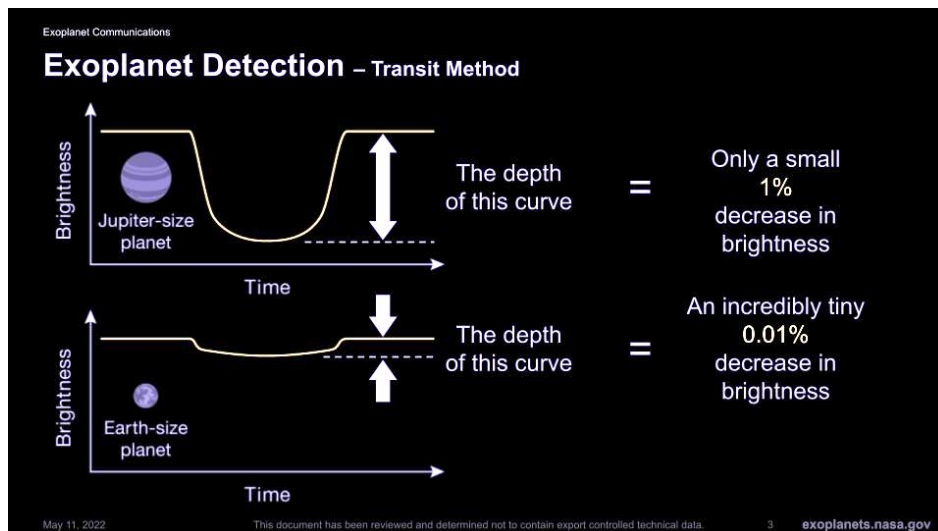


Abb. 2.1: Transitmethode mit Veranschaulichung der Helligkeitsabnahme

durch die Transitmethode meist nur sehr große Planeten in Jupitergröße entdeckt werden, da bei erdähnlichen Planeten die Helligkeitsabnahme bei einer Verdunklung gering ist, sodass man sie kaum aufnehmen kann.

2.1.2 Radialgeschwindigkeitsmethode

Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode werden nach der Transitmethode die meisten Exoplaneten nachgewiesen. Die erste überzeugende Exoplaneten Entdeckung wurde durch die Radialgeschwindigkeitsmethode im Jahr 1995 erreicht (Perryman 2018). Dadurch, dass ein Stern durch die Gravitation die Planeten auf bestimmten Umlaufbahnen hält, hat der Planet oder mehrere Planeten auch einen Einfluss auf den Stern. Dies führt dazu, dass beide um den gemeinsamen Massenschwerpunkt kreisen. Wenn sich der Stern auf uns zu- oder wegbewegt, greift der Doppler-Effekt. Dem zufolge wird das emittierte Licht kurzwelliger, wenn sich der Stern auf die Erde zubewegt und das Licht wird langwelliger wenn sich der Planet wegbewegt. Das nennt man die Blau- oder Rotverschiebung. Diese Verschiebung kann man in einem Spektrum messen und dadurch auf die Existenz von mindestens einem Exoplaneten schließen, der diesen Stern zum "Wackeln" bringt. Durch den Nachweis in einem Spektrum kann man dann auch auf die Masse des Planeten schließen. Ein Vorteil der Radialgeschwindigkeitsmethode ist, dass mit ihr Planeten entdeckt werden können, die auch eine erdähnliche Masse besitzen.

2.1.3 Direkte Beobachtung

Bei der Methode der direkten Beobachtung werden Exoplaneten durch ein Teleskop aufgenommen. Bei dieser Methode versuchen die Forscher immer neue Möglichkeiten zu erlangen, damit man Exoplaneten in einem Bild direkt aufnehmen kann. Zum Beispiel kann eine Blende über den Stern gelegt werden, sodass das Sternenlicht das leuchtende Licht vom Exoplaneten nicht verschluckt (Abb. 2.2). Bis jetzt war es nur möglich riesige Planeten aufzunehmen die jung, sehr heiß und selbstleuchtend sind. Deshalb soll die Beobachtung von Exoplaneten, die das Sternenlicht reflektieren und wesentlich kleiner sind, mit ca. 30-40 m Teleskopen möglich sein. (Perryman 2018) Dafür soll im Jahr 2027 das Extremely Large Telescope (ELT) in Betrieb genommen werden,

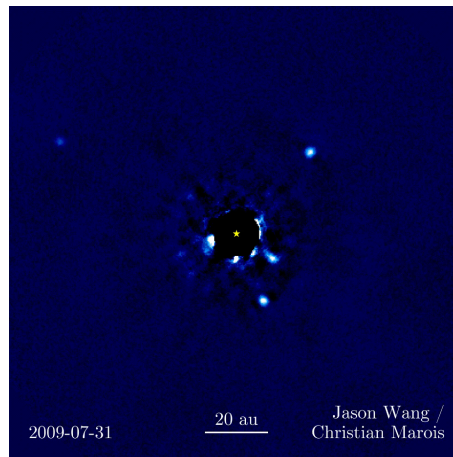


Abb. 2.2: Direkte Beobachtung eines Exoplaneten durch eine Blende

welches eine Öffnungsweite von 39 Meter hat. Diese Methode wird im Vergleich zu der Transitmethode oder Radialgeschwindigkeitsmethode nicht oft genutzt. Bis zum Jahr 2017 listete das National Aeronautics and Space Administration (NASA) Exoplanet Archive 44 Entdeckungen. Bis heute (Stand 2023) sind es insgesamt 69, also nur 25 neue Exoplaneten, die durch direkte Beobachtung entdeckt wurden (*5 Ways to Find a Planet | Explore 2023*).

2.1.4 Astrometrie

Die Astrometrie macht sich auch die Eigenbewegung des Sterns, um einen gemeinsamen Masseschwerpunkt mit dem Exoplaneten zunutze. Jedoch wurde bis zum Jahr 2018 nur ein System alleine (ohne die Hilfe anderer Methoden) durch die Astrometrie entdeckt und im NASA Exoplaneten Archiv unter der Entdeckung durch Astrometrie verzeichnet (Perryman 2018). Dies weist schon darauf hin, dass es sich hierbei um eine sehr schwierige Methode handelt, da sie eine sehr genaue Präzision erfordert. Denn bei dieser Methode soll die Bewegung des Sternes aufgenommen werden, was erklärt, warum diese Methode schwierig umzusetzen ist, da hierfür auf eine große Entfernung minimale Bewegungen aufgenommen werden müssen.

2.1.5 Mikrolinseneffekt

Durch den Mikrolinseneffekt können besonders weite Exoplaneten nachgewiesen werden. Diese Methode nutzt die Schwerkraft des Exoplaneten, um diesen nachzuweisen, indem der Stern hinter den Exoplaneten treten muss, damit das Licht durch die Schwerkraft des Exoplaneten gekrümmt wird und auf der Erde beobachtet werden kann. In der aufgenommenen Lichtkurve des Sterns erkennt man dann eine Verstärkung oder Ausprägung, die auf den Einfluss durch die Gravitation eines Exoplaneten zurückzuführen ist. Ein Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass man ganz wie bei der Transitmethode warten muss, bis der Planet seinen Stern einmal umkreist hat. Deshalb ist es ein Problem, da man aus der ersten Beobachtung nicht schließen kann, wie lange der Exoplanet für einen Umlauf braucht.

3 Transitbestimmung des Exoplaneten Kepler-412 b

3.1 Forschungsziel

Im Rahmen der eigenen Forschung wird ein Transit des Exoplaneten Kepler-412 b aufgenommen und verarbeitet. Zum einen soll der Transit, also die Verdunklung des Muttersternes aufgenommen werden und daraus Systemparameter berechnet werden. Natürlich weist man durch die Aufnahme des Transits den Exoplaneten auch nach.

3.2 Der Exoplanet Kepler-412 b

Der Exoplanet Kepler-412 b ist ein Gasplanet in einem System mit einer Sonne, die der Größe unserer Sonne ähnlich ist. Das System befindet sich am Winterhimmel oberhalb des Sternes Vega, aber ist mit dem bloßen Auge am Nachthimmel ohne Hilfe nicht zu erkennen. Kepler-412 b wurde mit der Radialgeschwindigkeitsmethode mit dem Teleskop SOFIA im Jahr 2014 entdeckt und die Daten als erstes von M.Deleuil¹ ausgewertet.

3.3 Beobachtung des Transits

Die Beobachtung des Transits geschah mit einem Schmidt-Cassegrain Teleskop mit einer Optik von 0.36 m Öffnung und einer Brennweite von 2720 mm . Als Kamera wurde die ZWO ASI620MM Pro verwendet. Zusätzlich wurde in das Filterrad ein UV/IR-Sperrfilter eingesetzt, welcher zu einer Verbesserung der Bildqualität beitragen soll (Abb. 3.1). Über remote control konnte ich auf die Sternwarte von Bernd Koch in Sörth/ Westerwald² zugreifen und die Ausrüstung benutzen, um meine Aufnahme durchzuführen. Zunächst wurde auf der Seite Exoplanet Transit Database (ETD) ein geeigneter Transit herausgesucht. Dieser hat sich dann am 17.10.2023 eröffnet (Abb. 3.2). Aufgenommen haben wir schon etwa 20 min vor und nach dem angegebenen Transitbeginn und Transitende, um Ungenauigkeiten auszuschließen. Verwendet wurde für die Aufnahme die



Abb. 3.1: Ausrüstung der Aufnahme: (1) Optik: 0.36 m Schmidt-Cassegrain Teleskop, (2) Filterrad mit UV/IR-Sperrfilter, (3) Kamera: ZWO ASI6200MM Pro

¹AixMarseilleUniversität,CNRS,LAM(Laboratoire d'Astrophysique de Marseille)UMR7326,13388Marseille,France
e-mail:magali.deleuil@lam.fr

²IAU Observatory Code: B72

Kepler-412 b	18:10 Lyr 74°,W	17.10. 19:09 65°,W	20:08 56°,W	117.582 14.309 0.0104	54966.02102+1.7208612825°E RA: 19 04 26.001 DE: +43 40 51.001
---------------------	--------------------	-------------------------------------	----------------	-----------------------	---

Abb. 3.2: Vorhersage des Transits für den Exoplaneten Kepler-412 b

astronomische Software Nighttime Imaging 'N' Astronomy (N.I.N.A.). Dafür wurde dann der Stern des Exoplaneten mit Hilfe von Stellarium im Aufnahmefeld des Teleskops ausgerichtet und fokussiert. Für die Aufnahme haben wir eine wiederkehrende Belichtung mit 60s Belichtungszeit eingestellt. Außerdem wurde ein Autofokus eingestellt, der zu einer gewissen Zeit nach jeder Aufnahme ausgeführt wird, damit das Bild nicht ungenau wird (Abb. 3.3). Zwischen den Aufnahmen

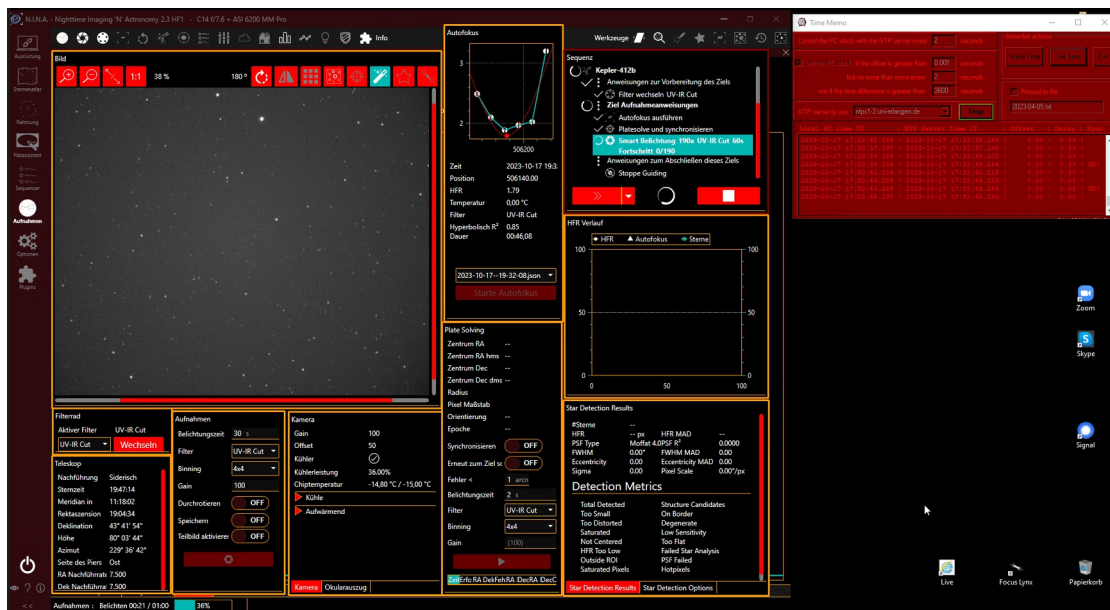


Abb. 3.3: Softwareoberfläche während der Beobachtung des Transits

musste ein paar Mal nachfokussiert werden, da sich der Tubus des Teleskops aufgrund sinkender Temperatur zusammenzieht und sich dadurch die Brennpunktlage verändert. Dazu kam noch die Aufnahme von je 20 Flat und Dark Flats mit einer Belichtungszeit von 1 – 10s. Für Darkframes wurde die Teleskopöffnung geschlossen und 25 Bilder mit 60s Belichtungszeit aufgenommen, um die gleichen Bedingungen wie bei der Aufnahme des Transits beizubehalten.

3.4 Erstellung der Lichtkurve

Die Kalibrierung der Lichtkurve aus der Aufnahme des Transits erfolgte in der Software Muniwin. Zunächst wurden die Flat- und Darkframes zu einem Master Frame zusammengefasst. Beide dienen der Bildkorrektur für die Aufnahmen des Transits, durch die zum Beispiel Staub auf den Glasflächen im Strahlengang des Teleskops aus dem Bild subtrahiert wird (Formel 3.1). Für ein möglichst fehlerfreies Bild übernimmt die Software Muniwin dann die Berechnung nach der folgenden Formel:

$$\text{Kalibriertes Bild} = \frac{\text{Lightframe} - \text{MasterDark } 1}{\text{MasterFlat} - \text{MasterDark } 2} \quad (3.1)$$

Als Lightframe wird das rohe Bild nach der Aufnahme bezeichnet. In Muniwin wird die Funktion als „Express reduction“ bezeichnet, durch die sowohl die Bildkorrektur angewendet werden kann,

als auch die Einstellung von unterschiedlichen Blenden (Photometry) und eine Registrierung der Sterne durchführt (Matching). So hat man in der Software die Auswahl zwischen verschiedenen Blenden, wobei man sich für diejenige mit dem besten Signal-Rauschverhältnis entscheidet. Des Weiteren habe ich danach kontrolliert, ob die Registrierung des gewünschten Sterns in allen Bildern richtig von der Software mit der entsprechenden Blende angewendet wurde. Alle Bilder, deren Qualität nicht ausreichend waren, mussten entfernt werden, weil sie das Ergebnis nur gestört hätten. Denn die Software legt über den Stern in jedem Bild einen Kreis, in dem die Helligkeit gemessen wird. Neben diesem Kreis legt die Software einen weiteren, mit dem die Helligkeit des Himmels und des Sterns gemessen wird, wodurch nun die Helligkeit des Sterns berechnet werden kann.

Zum Erstellen der Lichtkurve musste man dann in der Software anschließend Vergleichssterne auswählen, die bei der Helligkeitsberechnung helfen. Diese Vergleichssterne oder auch Compstars genannt, sollten eine möglichst konstante Helligkeit während der gesamten Beobachtung haben. Dabei kann man entweder mehrfach ausprobieren, mit welchen Sternen man das beste Ergebnis erlangt, oder man orientiert sich an anderen Astronomen, die zum Beispiel auf ETD auch ihre Compstars angegeben haben und damit vielleicht schon eine gute Auswahl gefunden haben. So erhält man eine Lichtkurve durch die Funktion „Plot light curve“ in Muniwin, die die Helligkeitsabnahme des Sternes zeigt (Abb. 3.4). Diese Auswertung der Daten kann man in Muniwin in einer Textdatei exportieren, um sie auf ETD hochzuladen.

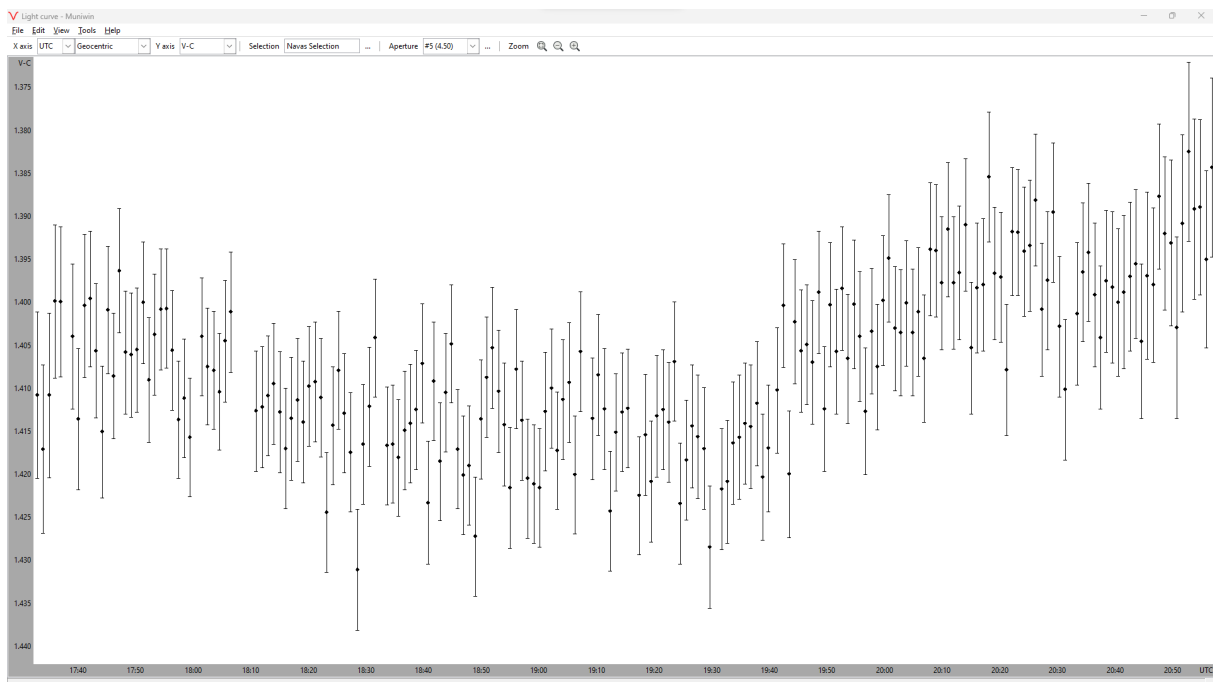


Abb. 3.4: Erstellte Lichtkurve in Muniwin - aufgenommen am 17. Oktober 2023 von 17:20 bis 21 Uhr (UTC)

4 Eigene Forschung

4.1 Auswertung auf der Grundlage von ETD

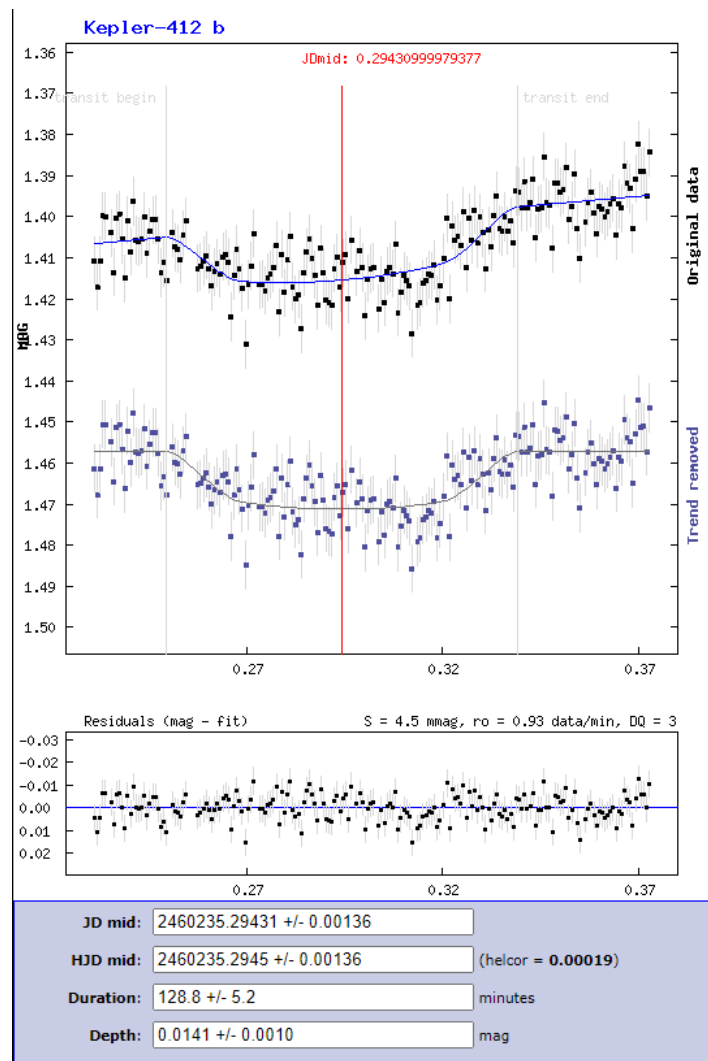


Abb. 4.1: Berechnete Werte aus den Transitdaten von ETD

In ETD bekommt man erste Angaben zu der Helligkeitsabnahme des Sterns, welche bei meiner Lichtkurve bei $0.0141^{+0.0010}_{-0.0010}$ mag liegt (Abb. 4.1). Man sieht schließlich auch seine Daten direkt im Vergleich zu anderen Ergebnissen von anderen Astronomen. Außerdem berechnet ETD einen Planetenradius in Jupiterradien aus der verarbeiteten Lichtkurve, nachdem man diese Werte hochgeladen hat. Das Ergebnis ergab $1.427^{+0.049}_{-0.051} R_{Jup}$, was ein sehr gutes Ergebnis ist, da es nur etwa 7,7% größer als der Wert des Exoplaneten mit $1.325^{+0.043}_{-0.043} R_{Jup}$ ist, welcher auf der Seite ETD für den Radius des Exoplaneten angegeben ist.

4.1.1 Berechnung der Systemparameter; Planetenradius

Eine Berechnung der Systemparameter kann durch Formeln der Himmelsmechanik durchgeführt werden und wird im Folgenden angewandt. Die Größe des Planetenradius kann an der Helligkeitsabnahme des Sternes berechnet werden (Abb. 4.2). Diese Formel wird aus dem Gesetz von Stefan und Boltzmann abgeleitet, wobei aus der gemessenen Tiefe der Bedeckung Δm

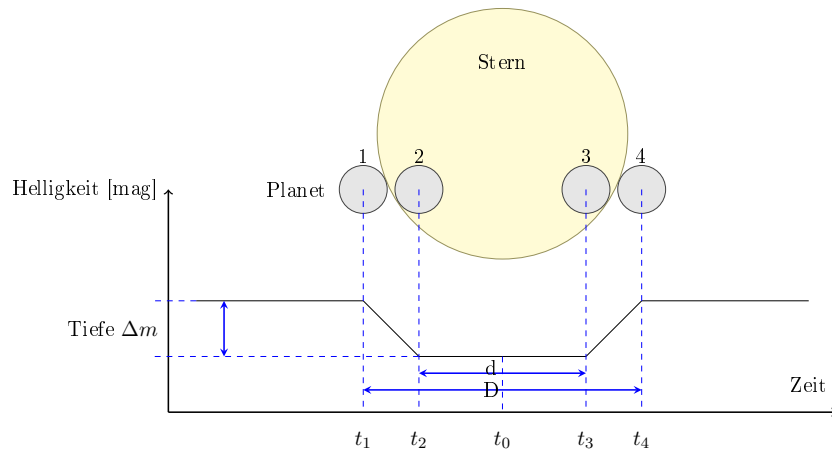


Abb. 4.2: Vereinfachte Lichtkurve des Exoplaneten-Transits, ohne die Berücksichtigung der Randverdunklung des Sterns

(Magnitude (mag)) die Änderung der Strahlungsleistung ΔF (Fluss, Flux) berechnet wird (Abb. 4.2). Dabei wird davon ausgegangen, dass der Planet selber nicht zur Strahlungsleistung des Systems beiträgt.

$$\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{F_1} = 1 - \frac{F_2}{F_1} \quad (4.1)$$

Dafür lässt sich ein Flussverhältnis aus der Strahlungsleistung des Sterns F_1 außerhalb der Bedeckung und eine Strahlungsleistung F_2 während der Bedeckung berechnen. Für die Berechnung des Planetenradius erschließt sich die Formel:

$$R_p = R_\star \sqrt{\Delta F} \quad (4.2)$$

Für ΔF gilt:

$$\Delta F = 1 - 10^{-0.4\Delta m} \quad (4.3)$$

4.1.2 Berechnung der Systemparameter; Bahnneigung

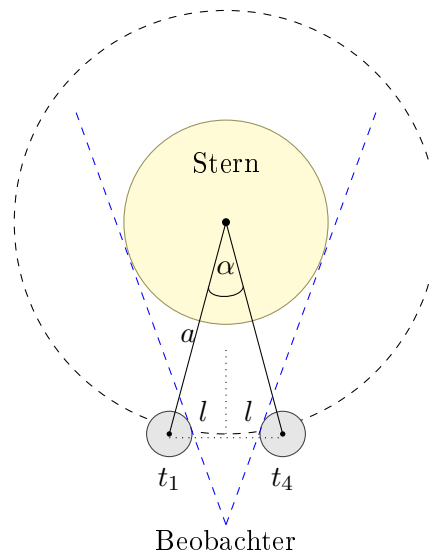


Abb. 4.3: Draufsicht auf das System. P ist eine volle Umlaufperiode

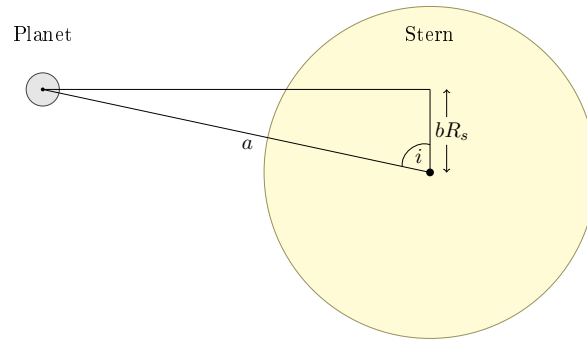


Abb. 4.4: Seitenansicht auf das System. b ist der Impact Parameter, i die Neigung der Planetenbahn, a die große Halbachse der Bahn, R_s der Sternradius

Des Weiteren lässt sich die Bahnneigung i durch das 3. Kepler'sche Gesetz berechnen. Wenn man sich die Umlaufbahn des Exoplaneten wie in Abbildung 4.3 als eine Kreisbahn vorstellt, kann durch die Winkelbeziehungen folgende Formel aufgestellt werden:

$$\cos i = \frac{b \cdot R_s}{a} \Leftrightarrow b = \frac{a}{R_s} \cdot \cos i \quad (4.4)$$

Die Dauer der Bedeckung wird berechnet mit: $D = t_4 - t_1$, dabei ist t_4 der Moment, an dem der Exoplanet vor den Stern tritt und t_1 , wenn er den Stern nicht mehr bedeckt. Der Winkel α bezeichnet den Winkel zwischen den großen Halbachsen a zum Zeitpunkt t_1 und t_4 . Die Hälfte der Distanz von t_1 zu t_4 bezeichnet man als l (Abb. 4.2 und 4.3). Nun stellt man sich die beiden Planeten als zwei nebeneinander anliegende Kreise vor, die den Abstand l voneinander haben (Abb. 4.4). Hier kann mit dem Satz des Pythagoras gerechnet werden. Für die Berechnung der Bahnneigung gilt also:

$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_s + R_p)^2}{a^2} - \sin^2 \left(\frac{D}{P} \cdot 180^\circ \right)} \quad (4.5)$$

Wenn man in die Formel der Bahnneigung 4.5 nun die Formel 4.2 einsetzt, kann diese weiter vereinfacht werden. Man kann ΔF mit der Formel 4.3 ersetzen und erhält:

$$i = \arccos \sqrt{\left(\frac{R_s}{a} \right) \cdot \left(1 + \sqrt{1 - 10^{-0.4 \Delta m}} \right)^2 - \sin^2 \left(\frac{D}{P} \cdot 180^\circ \right)} \quad (4.6)$$

4.1.3 Berechnung der Systemparameter - Kreisbahnradius (Herleitung)

Angenommen, dass der Exoplanet annähernd in einer kreisförmigen Bahn um seinen Stern zieht, kann man nach der Abbildung 4.4 in Kapitel 4.1.2 mit der Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes die Kreisbahn berechnen. Nach der Formel $\frac{a^3}{p^2} = \frac{G \cdot (M_s + M_p)}{4\pi^2}$ kann die Masse des Planeten M_p vernachlässigt werden, da sie um einiges kleiner ist, als die Masse des Sterns. Deshalb wird mit der Umlaufzeit (P) und der Gravitationskonstante (G) die Kreisbahn a durch folgende Formel berechnet:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_s \cdot P^2}{4\pi^2}} \quad (4.7)$$

4.1.4 Berechnung des Planetenradius

Die Formel (4.2) ist hergeleitet aus dem Gesetz von Stefan und Boltzmann und den Formeln 4.2 und 4.3, sodass für das Berechnen des Planetenradius gilt:

$$R_p = R_\star \cdot \sqrt{\Delta F} = R_\star \cdot \sqrt{1 - 10^{-0.4 \cdot \Delta m}} \quad (4.8)$$

Mit der eigenen Transitbeobachtung und dem Katalogwert des Sternradius (R_s) ist es mir möglich meinen Planetenradius zu berechnen. Dafür nehme ich den Katalogwert für den Radius des Sterns von ETD: $R_s = 1.287 \pm 0.03$ (Deleuil u. a. 2014). Außerdem rechne ich mit dem Sonnenradius: $R_\star \approx 6.956580 \cdot 10^5 \text{ km}$ (Perryman 2018). Damit habe ich dann nach der Formel 4.8 gerechnet:

$$R_p = (1.287 \cdot 6.956580 \cdot 10^5 \text{ km}) \cdot \sqrt{1 - 10^{-0.4 \cdot 0.0141 \text{ mag}}} = 101698.1969 \text{ km} / 6378 \text{ km} \approx 15.945 R_\oplus \quad (4.9)$$

Ich habe noch den Fehlerbereich ausgerechnet und das folgende Ergebnis erhalten. Nach meiner Transitaufnahme mit der Helligkeitsabnahme berechne ich folgenden Radius für den Exoplaneten Kepler-412 b:

$$R_p = 15.945 \pm 0.434 R_\oplus \quad (4.10)$$

4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1 Abweichungen von Systemparametern in Forschungsarbeiten

In den Forschungsarbeiten gibt es Diskrepanzen, da der Sternradius in einigen Arbeiten von Vorgängern übernommen wurde und nicht neu ermittelt wurde. Dies versuche ich im Folgenden zu klären, doch erstmal komme ich zu einer Bewertung der Auswertung durch die Datenbank ETD, die einen Radius des Exoplaneten berechnet (Kapitel 4.1).

Tab. 1: Tabelle der berechneten Planetenradien (R_p) in Erdradien (R_\oplus) im Vergleich. ($R_\oplus = 6378 \text{ km}$)

Quelle	Wert
Eigene Berechnung	$15.945 \begin{smallmatrix} +0.434 \\ -0.434 \end{smallmatrix} R_\oplus$
ETD	$15.995 \begin{smallmatrix} +0.5492 \\ -0.5717 \end{smallmatrix} R_\oplus$
Esteves u. a. 2015	$15.03 \begin{smallmatrix} +0.49 \\ -0.52 \end{smallmatrix} R_\oplus$
Berger u. a. 2018	$14.630 \begin{smallmatrix} +0.689 \\ -0.654 \end{smallmatrix} R_\oplus$
Bonomo u. a. 2017	$14.85 \begin{smallmatrix} +0.48 \\ -0.48 \end{smallmatrix} R_\oplus$
Morton u. a. 2016	$13.50 \begin{smallmatrix} +0.99 \\ -0.93 \end{smallmatrix} R_\oplus$
Deleuil u. a. 2014	$14.852 \begin{smallmatrix} +0.482 \\ -0.482 \end{smallmatrix} R_\oplus$

Dieser Wert ergab $1.427 \begin{smallmatrix} +0.049 \\ -0.051 \end{smallmatrix} R_{Jup}$. Die Tabelle (1) zeigt den berechneten Planetenradius aus dem aufgenommenen Transit, den errechneten Wert von ETD und den Wert von einigen Forschungsarbeiten aus den letzten zehn Jahren.

Man sieht, dass sowohl meine Berechnungen und auch die Werte aus den Forschungsarbeiten relativ nahe beieinander liegen. Die Abweichung liegt bei allen Werten in einem nicht unerwarteten Bereich, wenn man sie mit dem Katalogwert vergleicht. Da ist es umso erstaunlicher, dass sich der Wert des Sternradius bei den Forschungsarbeiten in den Jahren

2014 - 2017 nicht unterscheidet (Tab. 2). Die Forschungsarbeiten haben mit den Jahren einen Wert aus alten Berechnungen übernommen. Das wird dadurch bestätigt, da in den Referenzen der Arbeiten Deleuil u. a. 2014 verzeichnet ist, welcher als erster Daten zu diesem System berechnet hat. Interessant wird es, wenn man sieht, dass ab 2018 neue Werte des Sternradius berechnet wurden, die stark von den früheren Jahren abweichen (Tab. 2).

Tab. 2: Tabelle des Sternradius (R_\star) in Sonnenradien R_\odot

$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$1.210^{+0.089}_{-0.083} R_\odot$	$1.375^{+0.05}_{-0.1} R_\odot$	$1.342^{+0.063}_{-0.060} R_\odot$
Deleuil 2014 Esteves 2015 Bonomo 2017	Morton 2016	Gaia Collaboration 2018	Berger 2018

Deshalb möchte ich versuchen die Methode oder Vorgehensweise der Astronomen zu vergleichen und zu bewerten, indem ich im Folgenden den Planetenradius aus den unterschiedlichen Sternparametern mit meinem eigenen Δm Wert berechne und überprüfe zu welchem Ergebnis man kommt (Kapitel 4.2.2). Außerdem werde ich mir die Methoden der Berechnung der Astronomen in ihren Arbeiten anschauen und versuchen diese in Beziehung zu setzen (Kapitel 4.2.3). Damit ich dann am Ende vielleicht auch unter Beachtung der eigenen Werte und Berechnungen die Methode der professionellen Astronomie bewerten oder kommentieren kann (Kapitel 5).

4.2.2 Berechnung des Planetenradius aus unterschiedlichen Quellen

Tab. 3: Tabelle zum Vergleich der angegebenen Stern- und Planetenradien (R_{p1}, R_\star) aus den Forschungsarbeiten und des berechneten Planetenradius (R_{p2}) aus dem angegebenen Sternradius (R_\star) aus den Forschungsarbeiten und der beobachteten Helligkeitsabnahme (Δm). Bei den eigenen Messungen sieht man den Radius des Exoplaneten, den ETD aus meinem Transit berechnet hat. In der letzten Spalte sieht man den Radius des Exoplaneten, denn ETD aus den Transitdaten berechnen konnte.

Quellen: Forschungsarbeiten	Vorgegeben		Berechnet
	R_\star	R_{p1}	R_{p2}
Deleuil 2014	$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$14.852^{+0.482}_{-0.482} R_\oplus$	$15.945^{+0.434}_{-0.434} R_\oplus$
Esteves 2015	$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$15.03^{+0.49}_{-0.52} R_\oplus$	$15.945^{+0.434}_{-0.434} R_\oplus$
Bonomo 2017	$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$14.85^{+0.48}_{-0.48} R_\oplus$	$15.945^{+0.434}_{-0.434} R_\oplus$
Morton 2016	$1.210^{+0.089}_{-0.083} R_\odot$	$13.50^{+0.99}_{-0.93} R_\oplus$	$14.991^{+1.1}_{-1.03} R_\oplus$
Gaia Collaboration 2018	$1.375^{+0.05}_{-0.1} R_\odot$	-	$17.035^{+0.62}_{-1.23} R_\oplus$
Berger 2018	$1.342^{+0.063}_{-0.060} R_\odot$	$14.630^{+0.689}_{-0.654} R_\oplus$	$16.627^{+0.78}_{-0.74} R_\oplus$
ETD (Eigene Messung)	$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$14.852^{+0.482}_{-0.482} R_\oplus$	$15.945^{+0.434}_{-0.434} R_\oplus$
ETD (Aus Transitbeobachtung)	$1.287^{+0.035}_{-0.035} R_\odot$	$15.99^{+0.55}_{-0.57} R_\oplus$	-

In der Tabelle 3 habe ich den Planetenradius R_{p2} berechnet, indem ich den vorgegebenen Sternradius (R_\star) des jeweiligen Autors mit der Formel 4.8 und 4.9 durch meine beobachtete Helligkeitsabnahme (Δm) berechnet habe. Dadurch kann man meinen berechneten Wert (R_{p2}) mit dem berechneten Wert des Autors (R_{p1}) vergleichen. In dem Bild 4.5 sieht man den berechneten Radius des Planeten aus den aufgenommenen Daten, visualisiert von ETD.

Den Katalogwert nenne ich im Folgenden den Sternradius, der auf ETD angegeben ist und mit dem Wert des Autors Deleui übereinstimmt ($1.287^{+0.035}_{-0.035} R_S$). Beim Ausrechnen des Planetenradius aus den unterschiedlichen Werten fällt auf, dass mit dem Sternradius $1.287^{+0.035}_{-0.035} R_S$ der Planetenradius $1,487 R_J$ berechnet wird, der mit etwas mehr als 7% vom Katalogwert abweicht. Wenn man aus den neueren Arbeiten den Planetenradius nach meiner Methode berechnet, kommt

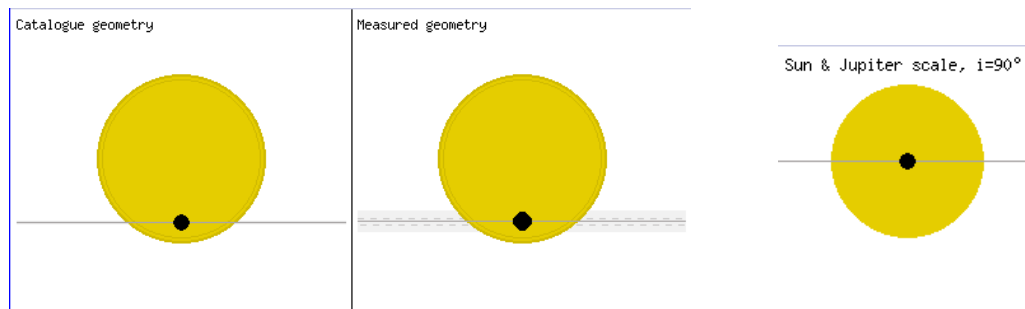


Abb. 4.5: Grafik von ETD zur Verdeutlichung der Größenverhältnisse zwischen dem Stern und dem Exoplanet. Links die Größe nach dem Katalogwert von ETD. Mitte die Größe nach den Werten der Transitaufnahme. Rechts das Größenverhältnis zwischen Sonne und Jupiter.

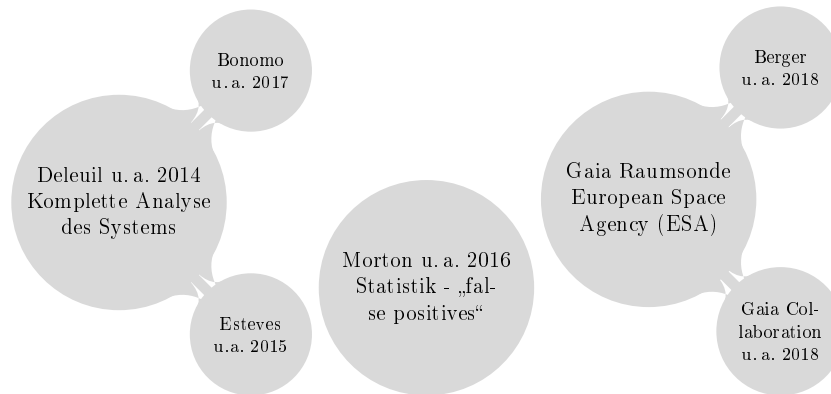
man auf einen Wert, der um einiges größer als der Katalogwert ist und auch von meinem selbst berechneten Wert um einiges abweicht (Tab. 3). Trotz des veränderten Sternradius in den neueren Arbeiten, verändert sich der Planetenradius zwischen den Arbeiten nicht sonderlich und ist um den Wert $1.325^{+0.035}_{-0.035} R_J$ angesiedelt. Das ist eine Unstimmigkeit, die man vielleicht dadurch erklären kann, wenn man sich die Methoden der Astronomen zum Berechnen des Sternradius einmal anschaut (Tab. 2).

In der Tabelle 2 sieht man die Sternradien, die die Forschungsarbeiten angegeben haben. Ich habe in der Tabelle 3 verschiedene Werte für den Planetenradius aus der Tabelle 2 mit den Sternradien durch die Formel 4.8 berechnet und mit dem Planetenradius verglichen, den die Forscher in ihrer Arbeit angegeben haben (Tab. 3).

4.2.3 Forschungsarbeiten der Astronomen und Berechnung von Systemparametern

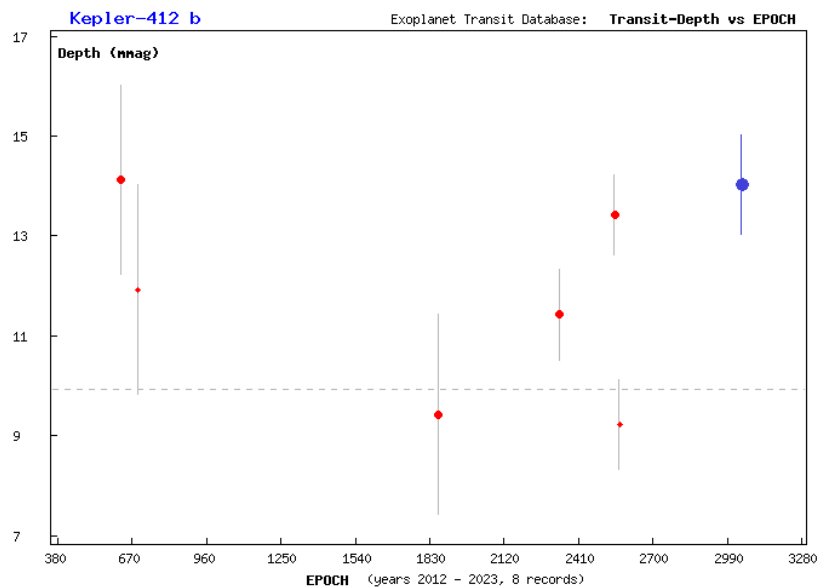
Nach genaueren Untersuchungen der Forschungsarbeiten ist mir aufgefallen, dass jede Arbeit einen ganz anderen Forschungsansatz verfolgte und unterschiedliche Forschungsfragen beantwortete. Diese Beziehung der Forschungsfragen habe ich versucht in der Abbildung 4.6 darzustellen. Damit ist eine Beziehung zwischen den Arbeiten zu erkennen, die denselben Sternradius übernommen haben. Denn die Arbeiten Esteves u.a. 2015 und Bonomo u.a. 2017 haben Werte für ihre Arbeit von anderen Forschern übernommen und damit auch den Wert für den Sternradius von Deleuil u. a. 2014. Denn die Forschungsarbeit von Deleuil u. a. 2014 basiert auf einer kompletten und ausführlichen Analyse des Systems Kepler-412, welche unter anderem durch die Radialgeschwindigkeitsmethode und Transitmethode durchgeführt wurde. Die Forschungsarbeit von Esteves u.a. 2015 dahingegen beschäftigt sich mit der Untersuchung der Atmosphäre von Exoplaneten durch die Spektroskopie, weshalb dort keine eigene Berechnung des Sternradius durchgeführt wurde. Genauso bei der Forschungsarbeit von Bonomo u. a. 2017, welche das Ziel hatte, die Exzentrizität und Masse von Exoplaneten zu bestimmen, also auch keine eigene Berechnung des Sternradius durchführte und ebenfalls Werte von Deleuil u. a. 2014 übernahm. Anders sieht es bei den restlichen Forschungsarbeiten aus. Sie haben alle unterschiedliche Werte für den Sternradius und doch scheinen die Werte für den Planetenradius gleich zu sein und sich nicht nach den Berechnungen der Formel 4.8 zu verändern, wie man in der Tabelle 3 sieht. So ist es, dass es sich bei der Arbeit von Morton u. a. 2016 um eine Analyse für eine Statistik handelt und deshalb die Parameter des Systems nicht im Hauptfokus der Arbeit stehen. Bei den beiden anderen Arbeiten (Gaia Collaboration u. a. 2018, Berger u. a. 2018) handelt es sich um Auswertungen der Daten von

Abb. 4.6: Verbindungen und Beziehungen zwischen den Forschungsarbeiten



der europäischen Raumsonde Gaia. Die berechneten Werte mit diesen Sternradien sind doch um einiges größer, als die restlichen Werte. Auffällig ist allerdings, dass in den Forschungsarbeiten der Wert nicht meinem berechneten entspricht und dadurch heraussticht (Tab. 3).

So scheint es, dass die Werte, die aus der Forschungsarbeit Deleuil u. a. 2014 stammen, eine gewisse Richtigkeit haben müssen, da sich die restlichen Werte und meine eigenen Werte auch um diese Zahl herumbewegen. Damit muss es verschiedene Rechenwege geben, mit denen man auf dasselbe Ergebnis kommt. Deshalb scheint es nur hierbei, um den Sternradius einige Ungenauigkeiten weiterhin zu geben, da die genannten Arbeiten dort unterschiedliche Werte angeben.

Abb. 4.7: Vergleich der Helligkeitsabnahme (Δm) mit anderen Werten von Transitbeobachtungen

Daran anschließen kann man außerdem noch den Vergleich der Werte der Helligkeitsabnahme anderer Amateurastronomen auf ETD (Abb. 4.7) und dabei erkennen, dass es dort eine große Spanne an Ergebnissen gibt. Daraus kann man schließen, dass es durch die Berechnung mit der Formel, wo Δm für die Berechnung verwendet wird (Formel 4.2), zu abweichenden Ergebnissen kommen kann, wie man in der Tabelle 3 sieht.

5 Fazit

Über die Jahre hinweg wurden einige Daten von unterschiedlichen Organisationen, aber auch privaten Leuten, gesammelt. Da die Datenbank ETD auch die Werte von der Forschungsarbeit Deleuil u. a. 2014 übernommen hat und diese Werte ebenfalls von anderen Datenbanken bestätigt werden³, ist davon auszugehen, dass dieser Wert als eine Art Katalogwert angenommen werden kann. Auch die guten Aufnahmen von Amateurastronomen liegen um diesen Wert und da kann ich auch meinen Wert vertreten sehen. In der Berechnung des Planetenradius ist es unausweichlich, nach der Formel 4.8 den Sternradius zu verwenden.

Doch anscheinend lässt sich auch auf anderen Wegen der Planetenradius berechnen, denn sonst hätten die Arbeiten, welche einen abweichenden Sternradius verzeichnet haben, auch einen erkenntlich verschiedenen Planetenradius angegeben (Tab. 3). Damit gibt es weitere Möglichkeiten einen Exoplaneten-Radius zu ermitteln, denn die Berechnung über die Helligkeitsabnahme könnte zu Ungenauigkeit führen, da dieser Wert oft variieren kann (Abb. 4.7). Dies bestätigt, dass es für die Forscher einfacher sein muss den Planetenradius in einen Bereich einzugrenzen, doch über den Sternradius ist man sich uneinig. Wichtig ist allerdings auch zu beachten, dass man bei einer Forschungsarbeit vorsichtig sein sollte, wenn man andere Werte übernimmt. Doch manchmal spart es viel Zeit und Aufwand und man kann sich auf eine Arbeit verlassen, wenn genau und verständlich beschrieben und erläutert ist, wie man an einen bestimmten Wert gelangt ist und diesen berechnet hat.

Deshalb lässt sich abschließend festhalten, dass ein Transit des Systems Kepler-412 erfolgreich von mir aufgenommen wurde und damit bestätigend nachgewiesen wurde. Außerdem konnten Systemparameter, darunter der Radius des Exoplaneten berechnet werden. Dieser erwies sich im Vergleich zu den Werten der Forscher als sehr plausibel mit einem Wert von $1.427^{+0.049}_{-0.051} R_{Jup}$, was einer Abweichung von nur 7,7% zum Katalogwert von ETD entspricht.

Darüber hinaus konnte die Frage des Übernehmens von Werten durch das genauere Betrachten der Forschungsarbeiten geklärt werden. Die Forschungsarbeiten unterscheiden sich in ihrer Auslegung und setzen deshalb unterschiedliche Ziele. Außerdem muss man eine Forschungsarbeit nicht wiederholen, wenn man nicht davon ausgeht, dass man etwas widerlegen kann.

Auf die Frage, warum es in den Daten der ESA-Weltraumsonde Gaia solche Diskrepanzen gibt und die Werte des Sternradius von den anderen Werten abweichen, habe ich versucht eine Antwort zu finden. Doch das Thema der Exoplaneten ist ein Forschungsbereich, welcher immer noch mit gewissen Ungenauigkeiten leben muss, da man bei Exoplaneten von Planeten in Systemen spricht, die Lichtjahre von der Erde entfernt sind. In Zukunft werden es Forscher höchstwahrscheinlich schaffen, Methoden und Technik zu entwickeln, die genauere Messungen ermöglichen. Bis dahin muss man mit Methoden arbeiten, die sich bewähren. Dazu trägt auch die Transitmethode bei, durch welche die Arbeit von anderen Forschern bestätigt und verglichen werden kann.

Damit sieht man, dass wir Menschen auf einem richtigen Weg sind, aber vielleicht niemals erwarten dürfen, dass wir das Universum verstehen werden. Darum baut man Vermutungen auf dem Wissen von bestätigter Arbeit auf. Damit habe ich ein Stück dazu beigetragen mit meinem Interesse, die Forschung der letzten Jahre zusammenzufassen und zu bestätigen, aber auch die Diskrepanzen aufzudecken.

³EU-Exoplaneten-Katalog

Abbildungsverzeichnis

2.1	NASA Bild - Internet (Abgerufen: 02.12.2023)	3
2.2	NASA Bild - Internet (Abgerufen: 02.12.2023)	4
3.1	Bild von Herr Bernd Koch	5
3.2	Screenshot von der Seite ETD	6
3.3	Screenshot von der Software N.I.N.A.	6
3.4	Screenshot von der erstellten Lichtkurve in der Software Muniwin	7
4.1	Screenshot von den Werten von ETD	8
4.2	Eigen umgesetzte Grafik	9
4.3	Eigen umgesetzte Grafik	9
4.4	Eigen umgesetzte Grafik	10
4.5	Screenshot von ETD - Internet (Abgerufen: 06.12.2023)	13
4.6	Selbsterstellte Mindmap	14
4.7	ETD Bild - Internet (Abgerufen: 09.12.2023)	14

Tabellenverzeichnis

1	Tabelle der berechneten Planetenradien (R_p) in Erdradien (R_\oplus) im Vergleich. ($R_\oplus = 6378 \text{ km}$)	11
2	Tabelle des Sternradius (R_\star) in Sonnenradien R_\odot	12
3	Tabelle zum Vergleich der angegebenen Stern- und Planetenradien (R_{p1}, R_\star) aus den Forschungsarbeiten und des berechneten Planetenradius (R_{p2}) aus dem angegebenen Sternradius (R_\star) aus den Forschungsarbeiten und der beobachteten Helligkeitsabnahme (Δm). Bei den eigenen Messungen sieht man den Radius des Exoplaneten, den ETD aus meinem Transit berechnet hat. In der letzten Spalte sieht man den Radius des Exoplaneten, denn ETD aus den Transitdaten berechnen konnte.	12

Softwareverzeichnis

Software aus dem Kapitel Beobachtung des Transits (Kapitel 3.3)

N.I.N.A. : <https://nighttime-imaging.eu/>

Software aus dem Kapitel Erstellung der Lichtkurve (Kapitel 3.4)

Muniwin : <https://c-munipack.sourceforge.net/>

Abkürzungsverzeichnis

NASA National Aeronautics and Space Administration

ESA European Space Agency

ETD Exoplanet Transit Database

ELT Extremely Large Telescope

N.I.N.A. Nighttime Imaging 'N' Astronomy

mag Magnitude

Literatur

- 5 *Ways to Find a Planet / Explore* (2023). Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System. URL: <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet> (besucht am 02. 12. 2023).
- Berger, Travis A. u. a. (1. Okt. 2018). „Revised Radii of Kepler Stars and Planets Using Gaia Data Release 2“. In: *The Astrophysical Journal* 866, S. 99. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.3847/1538-4357/aada83. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...866...99B> (besucht am 16. 12. 2023).
- Bonomo, A. S. u. a. (1. Juni 2017). „The GAPS Programme with HARPS-N at TNG . XIV. Investigating Giant Planet Migration History via Improved Eccentricity and Mass Determination for 231 Transiting Planets“. In: *Astronomy and Astrophysics* 602, A107. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361/201629882. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017A&A...602A.107B> (besucht am 16. 12. 2023).
- Deleuil, M. u. a. (1. Apr. 2014). „SOPHIE Velocimetry of Kepler Transit Candidates XI. Kepler-412 System: Probing the Properties of a New Inflated Hot Jupiter“. In: *Astronomy and Astrophysics* 564, A56. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361/201323017. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014A&A...564A..56D> (besucht am 01. 12. 2023).
- Esteves, Lisa J., Ernst J. W. De Mooij und Ray Jayawardhana (1. Mai 2015). „Changing Phases of Alien Worlds: Probing Atmospheres of Kepler Planets with High-precision Photometry“. In: *The Astrophysical Journal* 804, S. 150. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.1088/0004-637X/804/2/150. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...804..150E> (besucht am 16. 12. 2023).
- Gaia Collaboration u. a. (1. Aug. 2018). „Gaia Data Release 2. Summary of the Contents and Survey Properties“. In: *Astronomy and Astrophysics* 616, A1. ISSN: 0004-6361. DOI: 10.1051/0004-6361/201833051. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A&A...616A...1G> (besucht am 16. 12. 2023).
- Morton, Timothy D. u. a. (1. Mai 2016). „False Positive Probabilities for All Kepler Objects of Interest: 1284 Newly Validated Planets and 428 Likely False Positives“. In: *The Astrophysical Journal* 822, S. 86. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.3847/0004-637X/822/2/86. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...822...86M> (besucht am 16. 12. 2023).
- Perryman, M. A. C. (2018). *The Exoplanet Handbook*. Second edition. Cambridge: New York, NY : Cambridge University Press. 952 S. ISBN: 978-1-108-41977-2.
- Winn, Joshua N. (2023). *The Little Book of Exoplanets*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. 1 S. ISBN: 978-0-691-22117-5.

Danksagung für die Unterstützungsleistungen

Besonderen Dank an meinen Projektleiter Bernd Koch, welcher mich bei meiner Arbeit unterstützt und begleitet hat und mir für meine Messungen die IAU-Privatsternwarte B72 in Sörth zur Verfügung gestellt hat. Außerdem danke ich dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium für die Bereitstellung und Austragung des Projektkurses und die Möglichkeit, durch Herr Koch das Interesse in einer Teilnahme bei Jugend Forscht weiterzuführen. Vielen Dank auch an alle anderen, die mich auf jegliche Weise unterstützt haben.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Arbeit

„Bestimmung der Systemparameter des Exoplaneten Kepler-412 b mit Hilfe der Transitmethode - Exoplaneten in fernen Systemen“

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die in der Arbeit angegebenen Links wurden zum Zeitpunkt des Aufrufs überprüft und enthielten keine illegalen Inhalte. Für jegliche Änderungen der Inhalte übernehme ich keine Verantwortung.

Solingen, den 13. Januar 2023

Jonas Jacobs