

VORWISSENSCHAFTLICHE ARBEIT

Der Nachweis von extrasolaren Planeten mit der
Transitmethode - Herausforderungen und aktuelle Missionen

Lukas Legenstein

8b

Mag. Norbert Steinkellner

28.2.2020

1 Abstract

Die hier vorliegende vorwissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit der Suche nach Exoplaneten. Unter Exoplaneten (Exo = griechisch für außerhalb) versteht man Planeten, welche außerhalb des Sonnensystems liegen. Seit der ersten Entdeckung eines Exoplaneten 1995 durch ein Schweizer Forscherteam werden stets neue Missionen vorbereitet um neue Exoplaneten zu finden und um so nicht nur dem Fund von extraterrestrischem Leben einen Schritt näher zu kommen, sondern auch um die Entstehung und Einzigartigkeit unseres Planeten, der Erde, besser verstehen zu können.

In dieser Arbeit werden die wichtigsten Suchmethoden und aktuelle Weltraummissionen und ihre Abläufe erklärt. Weiters werden, anhand von Daten des Kepler- Weltraumteleskopes, der Ablauf der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse, nähergebracht. Dafür werden von der Kepler - Mission bereitgestellte, photometrische Messungen von Planetentransiten verwendet. Dabei wird der Fragestellung nachgegangen, wie gut Exoplaneten mit der Transitmethode auszumachen sind.

Diese VWA kommt zu dem Schluss, dass Exoplaneten neben dem üblichen Rauschen deutlich als Vertiefungen in einer photometrischen Kurve erkennbar sind. Um ausschließen zu können, dass ein anderes Objekt oder Ereignis den Lichtstärkenabstieg verursacht hat, muss die Einsenkung mindestens drei Mal periodisch gemessen werden.

Allerdings muss beachtet werden, dass sowohl bei der Transitmethode als auch bei anderen Methoden, die Genauigkeit in der Charakterisierung des Exoplaneten stark davon abhängt, wie gut der Stern bekannt ist und speziell bei der Transitmethode, in welcher Durchlaufbahn der Transit gemessen wurde.

2 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank für die ausgezeichnete Unterstützung gilt meiner betreuenden Lehrperson Herrn Mag. Norbert Steinkellner, der bei mir auch das Interesse für die Astronomie geweckt hat.

Herrn Univ. Ass. Dr. Paul Beck danke ich, für die Ratschläge und die Hilfe bei der Suche nach Messdaten von Exoplanetentransiten der Keplermission.

3 Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	2
2	Danksagung	3
3	Inhaltsverzeichnis	4
4	Einleitung	5
5	Begriffserklärung	6
6	Allgemeines über die Exoplanetenforschung	7
7	Nachweismethoden für Exoplaneten	9
7.1	Radialgeschwindigkeitsmethode	10
7.2	Direkte Methode	11
7.3	Mikrolinseneffekt	13
7.4	Transitmethode	14
7.5	Tabelle Vor- und Nachteile der Suchmethoden	18
8	Missionen zur Exoplaneten - Forschung	19
8.1	PLATO	19
8.2	ARIEL	21
8.3	CHEOPS	23
9	Auswertung und Interpretation einer Transitmessung	25
10	Ergebnis und Diskussion	28
11	Abbildungsverzeichnis	30
12	Tabellenverzeichnis	30
13	Literaturverzeichnis	31
14	Selbstständigkeitserklärung	33

4 Einleitung

Die Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems und die Frage nach extraterrestrischem Leben beschäftigt die Menschheit schon seit Jahrhunderten. Vor allem seit der Entdeckung des ersten Exoplaneten im Jahr 1995 erlebt die Exoplanetenforschung eine Welle der Begeisterung. Seit dieser Entdeckung konnten bereits über 4000 weitere Exoplaneten nachgewiesen werden. Ein Großteil der Entdeckungen ist auf die Transitmethode zurückzuführen.

Die vorliegende vorwissenschaftliche Arbeit befasst sich mit der Exoplanetenforschung wobei der Fokus auf die Transitmethode gelegt wird. Dabei werden auch Nachteile und Vorteile anderer Nachweismethoden ausgearbeitet. Weiters werden auch aktuelle Missionen, welche der Charakterisierung von Exoplaneten dienen, erklärt.

Ziel dieser Arbeit ist es ein allgemeines Verständnis von der Exoplanetenforschung zu vermitteln und die Herausforderungen in diesem Forschungsbereich zu erläutern. Um das Ziel zu erreichen, werden die Methoden zum Nachweis von Exoplaneten auf Vor- und Nachteile untersucht und anschließend die Ziele bereits geplanter Missionen vorgestellt, um einen Überblick über die weitere Vorgehensweise in der Exoplanetenforschung zu bekommen.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine Literaturrecherche, wobei Fachbücher verwendet wurden, durchgeführt. Weiters wurde die offizielle Seite der ESA und die Exoplaneten-Datenbank der NASA als Informationsquelle genutzt.

Zu Beginn der Arbeit liegt der Fokus auf der Entwicklung und der Geschichte der Exoplanetenforschung. Für ein besseres Verständnis werden auch wichtige Begriffe und Faktoren für die Charakterisierung von Exoplaneten erklärt.

Anschließend werden die Nachweismethoden für Exoplaneten vorgestellt und deren Problematik erklärt. Das darauffolgende Kapitel befasst sich mit zukünftigen Missionen und deren Zielsetzung. Dabei wird auch auf die angewandte Methodik und den geplanten Ablauf eingegangen.

Im letzten Abschnitt werden Daten der Keplermission ausgewertet und analysiert. Dabei soll vereinfacht gezeigt werden wie Graphen der Transitmethode ausgewertet werden und was diese als Ergebnis bedeuten.

5 Begriffserklärung

ESI	Earth similarity index; Gibt die Ähnlichkeit eines Himmelskörpers zur Erde an
PHI	Planet habitability index; Bewertet die Bewohnbarkeit eines Planeten
Hubble-Weltraumteleskop	Benannt nach Edwin Hubble; 1990 in Betrieb genommen
Habitable Zone	Zone mit, vom Stern abhängigen, Eigenschaften, welche für flüssiges Wasser benötigt werden
CHEOPS-Mission	Mission der ESA um Exoplaneten zu untersuchen und einzustufen; Start: Dezember 2019
ESA	European Space Agency; Europäische Weltraumorganisation
NASA	National Aeronautics and Space Administration US - amerikanische Luft- und Weltraumbehörde
AE	Astronomische Einheit Die durchschnittliche Entfernung zwischen Erde und Sonne (149 597 870 700 m)
Goldilocks zone	= habitable Zone Abstandsbereich von einem Stern in dem auf Planeten flüssiges Wasser dauerhaft vorkommen kann

Tabelle 1: Erklärung häufig verwendeter Begriffe

6 Allgemeines über die Exoplanetenforschung

Wie ich schon in der Einleitung erwähnt habe, wurde der erste bestätigte Exoplanet 1995 mit der Radialgeschwindigkeitsmethode gefunden. Tatsächlich wurden aber bereits in den 1980er Jahren mehrere Exoplaneten entdeckt, welche aber auf Grund von fehlender technischer Genauigkeit schnell als braune Zwerge oder als Messfehler abgetan wurden.

Es gibt sogar Aufzeichnungen von Sternspektren aus dem Jahr 1917, welche den ersten indirekten Nachweis eines Exoplaneten zeigen sollen. Der damals als verunreinigter, weißer Zwerg bezeichnete Stern ist heute als Maanen-Stern bekannt. Zitat: *„Mit verunreinigt wurde zum Ausdruck gebracht, dass das Spektrum die Existenz mehrerer schwererer Elemente enthielt“*. Diese Materie um den Stern müsste von einem schweren Himmelskörper gravitativ beeinflusst sein, so dass es nicht bereits vom Maanen-Stern aufgenommen wurde. Ein Exoplanet als Grund würde sich anbieten. Diese Hypothese wurde aber noch nicht bestätigt.

Damit ein Exoplanet als lebensfreundlich für erdähnliches Leben gilt, muss er unter anderem in der habitablen Zone (auch „Goldilocks zone“ genannt) um ein Zentralgestirn liegen. Der Grund dafür ist, dass sich flüssiges Wasser nur in diesem Abstandsbereich dauerhaft halten kann, ohne zu verdampfen oder zu gefrieren. Daher gehört die habitable Zone zu den wichtigsten Faktoren, um festzustellen ob ein Planet lebensfreundliche Bedingungen bereitstellt. Um die inneren und äußeren Grenzen dieser Zone zu berechnen wird die folgende Formel benutzt.

Formel für die Berechnung der habitablen Zone:

Innere Grenze:

$$a * (\text{Masse des Sterns in Sonnenmassen})^2$$

Äußere Grenze:

$$b * (\text{Masse des Sterns in Sonnenmassen})^2$$

Für a wird der Wert 0,95 AE eingesetzt, da diese die mindeste Entfernung ist, die ein Planet von einem Stern haben muss. Für b wird der Wert 1,35 AE eingesetzt (max. Entfernung).

Die Beständigkeit von flüssigem Wasser hängt allerdings auch von anderen Faktoren ab. Je größer der Planet ist, desto größer ist zumeist auch seine vulkanische Aktivität. Diese wiederum wirkt sich negativ auf ein dauerhaftes Vorkommen flüssigen Wassers aus.

Insgesamt werden die Bewohnbarkeit und die Erdähnlichkeit eines Planeten in zwei Werten festgehalten:

Der ESI gibt wie in der Einleitung schon erwähnt die Erdähnlichkeit eines Himmelskörpers an. Der Wert kann zwischen 0 und 1 liegen, wobei die Erde dem Wert 1 entspricht. Der erdähnlichste Körper unseres Sonnensystems ist der Mars mit einem Wert von 0,73. Der Wert wird durch „interior“-Eigenschaften und Oberflächeneigenschaften bestimmt. Dazu gehören der Radius, die Dichte und die Temperatur. Die Berechnung des ESI kann allerdings unterschiedlich ausgeführt werden und wird nur zur Bestimmung der Erdähnlichkeit benutzt. Über die Bewohnbarkeit sagen die Ergebnisse wenig aus, da die Wertung der Ergebnisse auf unseren bekannten Lebensbedingungen auf der Erde basiert¹.

Die Bewohnbarkeit eines Planeten wird deswegen mit einem anderen Wert, den PHI (= planetary habitability index), berechnet. Auch die Berechnung dieses Wertes wird ständig verbessert indem immer mehr Faktoren berücksichtigt werden. Dadurch soll die potenzielle Bewohnbarkeit von Planeten präziser eingeschätzt werden, um gezielte Nachuntersuchungen tätigen zu können. Allgemein werden dabei die Masse des Planeten, der Orbit des Planeten, die geschätzte Felsigkeit oder sogar die Exzentrizität des Orbits, in der Formel berücksichtigt. Die Verbesserung der Berechnung soll in Zukunft helfen Exoplaneten mit diesem, vorerst geschätzten, Wert gezielt genauer zu untersuchen. Mit Hilfe des Ergebnisses hat man bereits sogar mehrere Planeten als potenziell lebensfreundlicher als die Erde eingestuft².

¹ Vgl. Lebensraum Universum; Einführung in Exoökologie S.10

² Vgl. ebd. S.12

7 Nachweismethoden für Exoplaneten

Bevor der erste Exoplanet (51 Pegasi b) 1995 von Schweizer Forschern mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode gefunden wurde, ging man davon aus, dass die damals (noch 9) bekannten Planeten in unserem Sonnensystem eine absolute Ausnahme darstellten und die einzigen im Universum seien³. Daraufhin war die Entdeckung dieses Exoplaneten eine Sensation und es wurde weltweit begonnen neue Methoden für die Suche nach anderen extrasolaren Planeten zu entwerfen. 2019 wurde diese Entdeckung sogar mit dem Nobelpreis in Physik belohnt.

Seit damals hat sich viel in der Exoplanetenforschung getan: Es wurden bereits 4126 bestätigte Exoplaneten und noch viele mehr noch nicht bestätigte gefunden (Stand: 13.2.2020)⁴. Auch die Methoden und die Teleskope haben sich weiterentwickelt, was dazu führte, dass viele erfolgreiche Missionen gestartet werden konnten.

In diesem Kapitel möchte ich die vier bisher erfolgreichsten Nachweismethoden vorstellen und ihre jeweiligen Vorteile und Nachteile erläutern.

³ Vgl. Die Erforschung der Exoplaneten; auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems S.5

⁴ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

7.1 Radialgeschwindigkeitsmethode

Die Radialgeschwindigkeitsmethode macht sich das dritte newton'sche Axiom zunutze, welches beschreibt, dass sich zwei Massen gegenseitig anziehen. Das bedeutet, dass nicht nur ein Planet von einem Stern angezogen wird, sondern auch der Stern eine geringfügige Anziehung erfährt. Daher kreisen beide Körper um einen gemeinsamen Mittelpunkt, welcher Baryzentrum genannt wird⁵.

Da der Stern sich also auch innerhalb des Planetensystems bewegt und nicht stillsteht, ist es möglich, diese Bewegungen mit Hilfe des optischen Dopplereffekts zu messen. Wenn man einen Stern beobachten würde, welcher Planeten an sich gebunden hätte, würde man im Spektrum des Sternes eine Rot- bzw. Blauverschiebung erkennen. Das kommt daher, dass die Wellenlänge des Lichts gestreckt wird, wenn sich der Stern vom Beobachter entfernt, was zu einer Rotverschiebung im Spektrum führt. Wenn sich der Stern wiederum dem Beobachter nähert wird die Wellenlänge verkürzt und es kommt zu einer Blauverschiebung im Spektrum⁶, wie man in Abbildung 1 sehen kann. Durch die Verschiebung der Absorptionslinien im Spektrum kann bei einer Beobachtung auf die Radialgeschwindigkeit geschlossen werden.

Wenn man das Spektrum des Sterns über einen längeren Zeitpunkt beobachtet und die Wellenlängenverschiebungen öfters, periodisch messbar sind, deutet das auf einen oder mehrere Planeten hin⁷. Obwohl die Radialgeschwindigkeitsmethode eine der erfolgreichsten Nachweismethoden für Exoplaneten ist, hat sie einige Nachteile.

Wenn die Planeten, welche sich um den beobachteten Stern bewegen, eine deutlich geringere Masse als der Stern selbst haben, liegt das Baryzentrum so nah am Sternmittelpunkt, dass sich der Stern zum Beobachter kaum bewegt und daher die Sternbewegungen nicht messbar sind. Weiters ist die Radialgeschwindigkeitsmethode nicht anwendbar, wenn das Planetensystem zum Beobachter im 90° Winkel steht, da sich der Stern dann immer in der gleichen Entfernung vom Beobachter befindet.

Der größte Nachteil der Radialgeschwindigkeitsmethode besteht aber darin, dass die Ursache für eine Veränderung des Sternspektrums nie genau bestimmbar ist. Da als Gründe auch Sternflecken oder Änderungen in der chemischen Zusammensetzung des Sterns in Frage kommen, muss das Sternspektrum über einen langen Zeitraum überwacht werden.

⁵ Vgl. Das Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode als Technik zur Entdeckung extrasolarer Planeten 2.1.2

⁶ Vgl. Lebensraum Universum; Einführung in die Exoökologie S. 15

⁷ Vgl. Das Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode als Technik zur Entdeckung extrasolarer Planeten 2.1.4

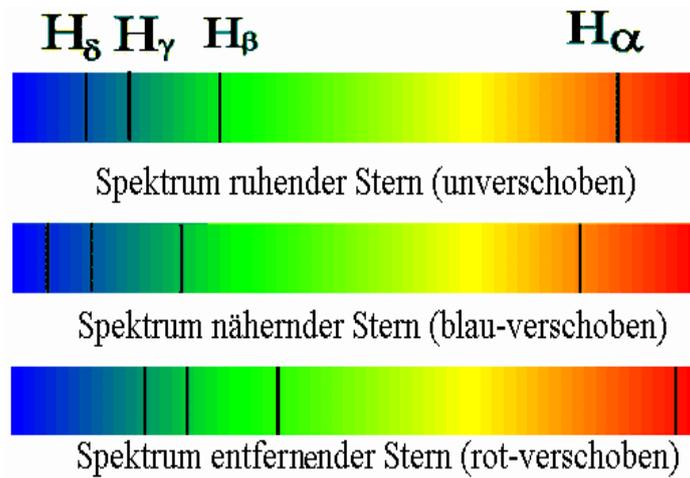


Abbildung 1: Spektrum mit Rot- Blauverschiebung

7.2 Direkte Methode

Bei der direkten Methode wird versucht, in Teleskopaufnahmen Exoplaneten zu erkennen. Sie ist zwar die simpelste Methode, aber gleichzeitig auch die, mit der es bisher am wenigsten Erfolg zu verzeichnen gab - durch die direkte Beobachtung wurden erst 130 Exoplaneten entdeckt (Stand 2018)⁹.

Da ein Stern meist die nähere Umgebung, und damit auch mögliche, ihn umkreisende Planeten stark überstrahlt, ist es mit der jetzigen Technologie wenig erfolgsversprechend mit der direkten Methode außerhalb der stellaren Nachbarschaft der Erde (bis ca. 500 Lj Radius) Exoplaneten zu suchen¹⁰. Vor allem dieser kleine Suchradius schränkt die möglichen Anwendungsgebiete der direkten Methode drastisch ein.

Der Erfolg hängt neben der Größe des Himmelkörpers vor allem vom Winkelabstand zwischen beobachtetem Objekt und Stern ab. Wenn der Winkelabstand zu klein ist (mind. 0,1 – 50 m“) erscheint der Planet und der Stern als ein einziges leuchtendes Objekt. Zusätzlich kann auch das Alter des Planeten über den Erfolg entscheiden. Denn da junge Planeten tektonisch noch sehr aktiv sind, strahlen sie vermehrt im Infrarotbereich. Nach dieser Strahlung kann man mit entsprechenden Filtern oder Infrarotteleskopen gezielt suchen. Aus diesen Gründen beschränkt sich die direkte Methode auf Planetensysteme in der direkten Umgebung der Erde bzw. des Ortes der Observierung.

⁸ Sternspektrum mit Blau- Rotverschiebung; URL: <https://www.leifiophysik.de/optik/wellenmodell-des-lichts/versuche/rot-und-blauverschiebung> [Stand 19.2.2020]

⁹Vgl. Direct Detection of Exoplanets S.2

¹⁰Vgl. Exoplanet Detection Techniques S.8

Außerdem eignet sich die Methode hauptsächlich für lichtstarke oder heiße Exoplaneten die weit vom Zentralstern entfernt sind.

Ein weiterer Nachteil ist, dass mit der direkten Methode die Masse der Exoplaneten nicht direkt bestimmbar ist (Alter, Temperatur und Masse des Sternes werden für eine Schätzung benötigt). Ein Vorteil dieser Methode ist es aber, dass mit ihr die Bahndaten der Exoplaneten sehr genau bestimmbar sind¹¹.

Für die direkte Methode werden sowohl erdgebundene Teleskope als auch Weltraumteleskope verwendet, welche den Vorteil haben, nicht von der Atmosphäre beeinflusst zu werden. Die wohl bekannteste Mission, welche die direkte Methode als Suchprinzip verwendete, ist das Hubble-Weltraumteleskop, welches seit 1990 in Betrieb ist.

In Abbildung 2 sieht man den im Jahr 2004 abgebildeten Stern GQ Lupi A (A) und seinen Begleiter GQ Lupi B (b). Das Bild wurde mit Hilfe des VLT (Very Large Telescopes) in Chile aufgenommen. Dabei könnte es sich bei GQ Lupi B um einen Exoplaneten handeln. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich dabei um einen braunen Zwerg (Zwischenform in der Mitte von Stern und Planet) handelt, da dessen Masse nicht genügend genau bestimmbar ist.

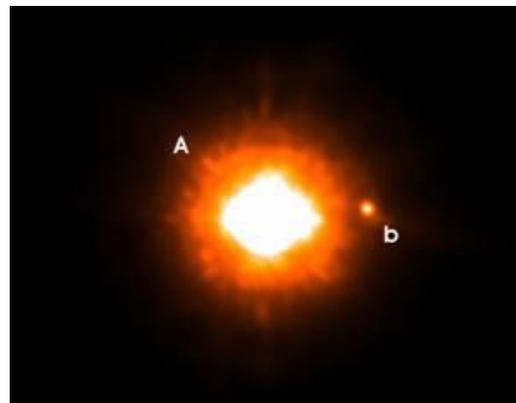


Abbildung 2: Stern (A) mit Objekt (b)

12

¹¹ Vgl. ebd. S.10

¹² Beispiel direkte Methode. URL; <http://wincontact32naturwunder.blogspot.com/2011/06/exoplaneten-5-direkte-beobachtung.html> [Stand: 19.2.2020]

7.3 Mikrolinseneffekt

Eine weitere Methode zur Suche nach Exoplaneten entwickelte sich aus dem Mikrolinseneffekt. Das Prinzip ist seit Albert Einsteins allgemeinen Relativitätstheorie bekannt. Der Name kommt daher, da schwere Objekte im Raum den Verlauf des Lichtes beeinflussen. Das geschieht dadurch, dass Massen den Raum krümmen, ähnlich wie eine Kugel ein gespanntes Tuch verformt. Dadurch wird das Licht, wie bei einer Linse gesammelt, wodurch für einen Beobachter der lichtemittierende Körper verstärkt dargestellt wird. Wenn sich also ein Stern vor einer Lichtquelle bewegt, erscheint diese für einen Beobachter heller. Hat der Stern zusätzlich ein Planetensystem, verläuft die Verstärkung der Lichtquelle unregelmäßig, da durch die Planeten weitere Gravitationslinsen hinzugekommen sind. Die Änderung in der Helligkeitskurve ist nicht dauerhaft, da sich die Planeten auf der Achse zwischen Lichtquelle und Stern befinden müssen¹³.

Mit Hilfe des Mikrolinseneffektes wurden ca. 100 Exoplaneten (Stand: November 2013) gefunden.

Zu den Vorteilen der Methode gehört, dass die Entfernung des Sternensystems zum Beobachter weitläufig keine Rolle spielt. Daher zählen die mit dieser Methode entdeckten Exoplaneten zu den am weitesten entfernten Exoplaneten, die bisher gefunden werden konnten. Die Distanz der Exoplaneten zur Erde beträgt bis zu mehreren tausend Lichtjahren. Ein Nachteil der Methode ist, dass es nur äußerst selten vorkommt, dass ein Hintergrundstern von einem Objekt verstärkt wird. Außerdem konnte bisher noch keine Verstärkung wiederholt beobachtet werden¹⁴.

¹³ Vgl. The Exoplanet Handbook S.83

¹⁴ Vgl. ESA

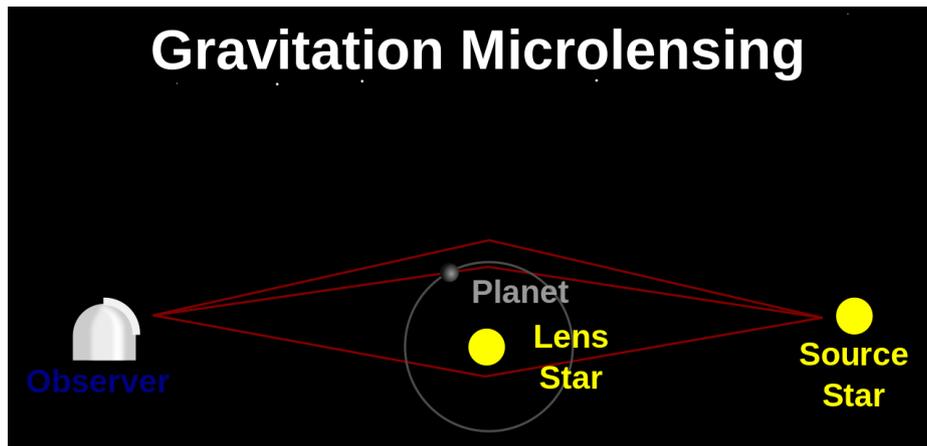


Abbildung 3: Mikrolinseneffekt

7.4 Transitmethode

Das Wort Transit wird als Synonym für Durchquerung oder Durchreise verwendet. Wenn in der Astronomie von einem Transit gesprochen wird, meint man meist den Durchgang eines Himmelskörpers vor einem Stern. Bei einem Transit fällt die Helligkeit des Sterns je nach Durchgangsbahn und Größe des Transitobjektes ab. Dieser Abfall der Leuchtkraft ist gut messbar und man kann durch eine solche Messung auf viele Eigenschaften des vorbeiziehenden Objektes schließen (Masse, Radius des Himmelskörpers, Umlaufbahn und chemische Zusammensetzung der Atmosphäre). Die Helligkeitswerte werden dann in einem Diagramm eingetragen und es fällt ein Einsturz der Leuchtkraft, wie in Abbildung 5 gut zu sehen ist, auf.

Mit einem Anteil von über 40% an den bisherigen Exoplanetenfunden ist die Transitmethode die mit Abstand erfolgreichste Methode. Der erste Exoplanet, den man mit Hilfe der Transitmethode gefunden hat, war HD 209458 b, welcher 1999 entdeckt wurde. 2006 startete dann die erste Mission (COROT von CNES), die es sich zum Nebenziel gemacht hatte, Exoplaneten mit der Transitmethode zu finden. Während der gesamten Mission wurden dann aber statt den erhofften hunderten nur 32 Exoplaneten entdeckt¹⁶.

Deutlich erfolgreicher war die von NASA im März 2009 gestartete Kepler - Mission, deren

¹⁵ Mikrolinseneffekt; URL: https://www.researchgate.net/figure/Gravitational-microlensing-by-a-star-and-the-planet-around-it_fig3_267515440 [Stand: 19.2.2020]

¹⁶ Vgl. Modeling and Observing Extrasolar Planetary Transits S. 90

Hauptziel es war erdähnliche Exoplaneten in der habitablen Zone zu finden. Ursprünglich nur für eine Einsatzzeit von 3,5 Jahren vorgesehen, wurde das Weltraumteleskop erst im November 2018 auf Grund von Treibstoffmangel endgültig abgeschaltet. In dieser Zeit wurden über 2600 Exoplaneten gefunden, darunter über 350 erdähnliche.

Die Transitmethode ist eine photometrische und indirekte Nachweismethode. Das heißt, dass nicht die Exoplaneten selbst, sondern der Stern um den sie sich bewegen, beobachtet wird. Wenn um den Stern ein Planet kreist, bewirkt dieser, bei einem Transit, kurzzeitig einen Helligkeitsabfall und wieder einen Helligkeitsanstieg des Sterns. Diese Lichtstärkenkurve, die dabei gemessen wird, muss sich mindestens dreimal, periodisch wiederholend nachweisen lassen, bevor der neue Exoplanet eingetragen werden kann.

Vorteile:

Durch die Stärke des Helligkeitsverlustes während des Transits, kann über die Transittiefe direkt auf die Größe und die Umlaufbahn des Exoplaneten geschlossen werden. Außerdem wird das Licht des Sternes in der Atmosphäre des Planeten von Gasen und Molekülen absorbiert. Je nach Zusammensetzung der Atmosphäre des Exoplaneten werden verschiedene Wellenlängenabschnitte aus dem Licht herausgefiltert, wobei diese dann in einem Lichtspektrum als schwarze Linien (Fraunhofer'sche Linien) erkennbar sind (s. Abb. 4). Außerdem ist es möglich, durch das Erstellen eines weiteren Lichtspektrums, wenn der Exoplanet vollständig hinter dem Stern verschwunden ist, die Temperatur und die exakte Zusammensetzung der Planetenatmosphäre herzuleiten. Dabei wird das Spektrum des Exoplaneten, während er sich hinter dem Stern befindet, vom Spektrum, welches während des Transits gemessen wird, abgezogen.

Nachteile:

Trotz der vielen Vorteile der Transitmethode, gibt es auch nicht zu vernachlässigende Nachteile. Ein Nachteil ist, dass die Messungen nicht von der Erde aus vorgenommen werden können, da die Erdatmosphäre für genaue Messdaten und Analysen der Planetenatmosphäre hinderlich wäre. Dadurch müssen sehr kostspielige Weltraummissionen entworfen werden, welche oft eine jahrzehntelange Planung erfordern, um die bestmöglichen Ergebnisse sicher zu stellen.

Hinzu kommt, dass die Helligkeitsschwankungen nur sehr gering sind, so dass die Teleskope sehr hohe Anforderungen zu erfüllen haben.

Das größte Problem aber stellt der Winkel, aus dem das Planetensystem beobachtet wird, dar. Die Transitmethode funktioniert nämlich nur, wenn sich der Planet auf der Ebene zwischen observiertem Stern und Beobachter befindet. Daher muss die Inklination idealerweise 90° betragen. Dieser Zustand wird oft auch „Edge-on“ genannt. Kleinere Abweichungen stören nicht. Die maximale, erlaubte Abweichung von diesem Winkel hängt von der Entfernung des Sterns und dem Teleskop ab.

Ein weiteres großes Problem besteht in der Charakterisierung der Planeten. Durch das „Limb darkening“, dem Effekt, dass Sterne in der Mitte deutlich heller als am Rand erscheinen (s.Abb.6), wird ein Exoplanet, welcher beim Transit in seiner Bahn nicht vor dem Zentrum des Sternes vorbeizieht, für massereicher gehalten, als er es eigentlich ist. Dadurch können falsche Rückschlüsse auf die Struktur und Zusammensetzung des Planeten auftreten. Eine weitere Ungenauigkeit kann dadurch auftreten, dass die Daten von circa 98% der gefunden Planeten durch Werte des Sternes berechnet werden. Das Problem dabei liegt darin, dass die Eigenschaften der Sterne ebenfalls schwer bestimmbar sind¹⁷.

¹⁷ Vgl. Synergies Between Asteroseismology and Exoplanetary Science S. 12

18

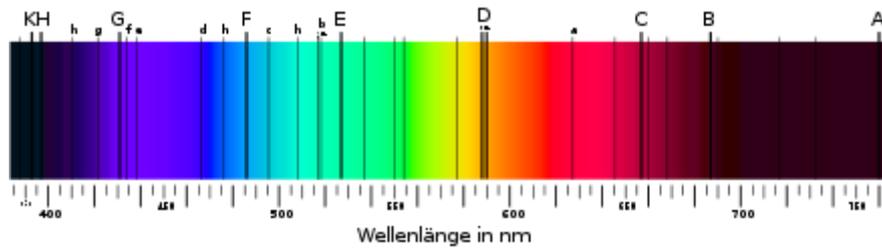


Abbildung 4: Sternspektrum mit Fraunhofer'sche Linien

19

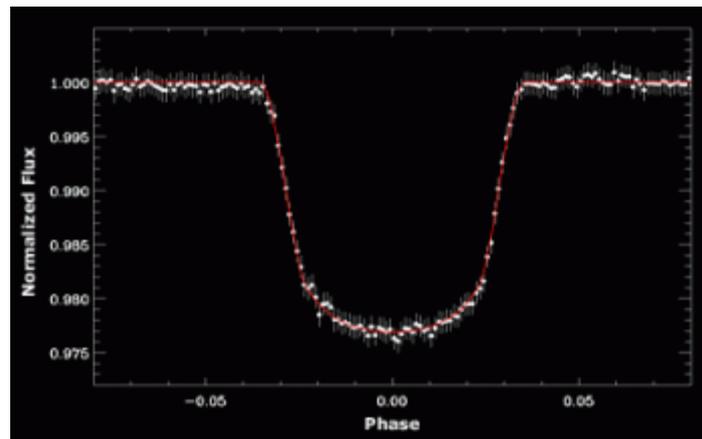


Abbildung 5: Helligkeitskurve mit Einbruch (COROT)

20

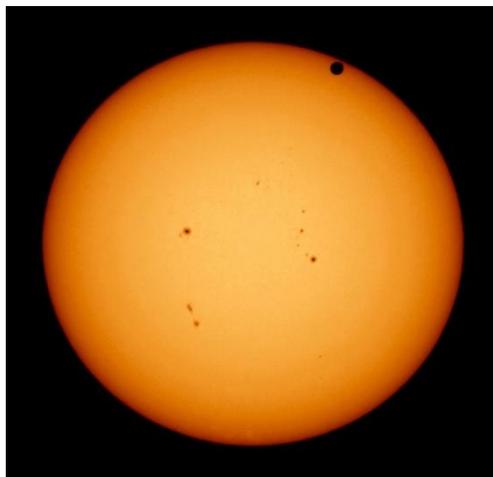


Abbildung 6: Limb darkening (Sonne mit Venus)

¹⁸ Lichtspektrum; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fraunhofer_lines_DE.svg [Stand 19.2.2020]

¹⁹ Helligkeitskurve COROT; URL: <https://www.raumfahrer.net/news/astronomie/03052007225454.shtml> [Stand:21.2.2020]

²⁰ Limb darkening; URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:2012_Transit_of_Venus_from_SF.jpg [Stand:20.2.2020]

7.5 Tabelle Vor- und Nachteile der Suchmethoden

Um einen besseren Überblick über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Nachweismethoden zu bekommen, wurden diese in der nachfolgenden Tabelle nochmals gesammelt dargestellt.

Methode	Vorteile	Nachteile
Transitmethode	Radius und chemische Zusammensetzung der Atmosphäre gut bestimmbar	Blickwinkel muss parallel zur Bahnebene stehen; „Limb darkening“ als Ursache für falsche Charakterisierung
Direkte Methode	Sehr junge Exoplaneten gut auffindbar	Lange Beobachtungszeiten; nur nahe Sterne; hauptsächlich junge Planeten
Mikrolinseneffekt	Weit entfernte Exoplaneten leicht nachweisbar	Sehr selten; nicht wiederholbare Beobachtungen
Radialgeschwindigkeitsmethode	Masse des Exoplaneten gut berechenbar (nur bei genaueren Daten des Sterns möglich)	Hauptsächlich große Exoplaneten; Blickwinkel darf nicht senkrecht auf Bahnebene stehen; nicht eindeutige Ursache auszumachen

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Suchmethoden

8 Missionen zur Exoplaneten - Forschung

Die erste Mission, die für die Suche nach Exoplaneten entwickelt wurde, war COROT. Das Weltraumteleskop entstand in Zusammenarbeit der CNES (französische Raumfahrtagentur) und der ESA. Es startete 2006 und fand in den 6 aktiven Jahren bis 2012 circa 30 Exoplaneten. Vor allem durch den Start der Keplermission wurden seitdem viele weitere Exoplaneten entdeckt.

In diesem Kapitel werde ich drei Missionen beschreiben, deren Aufgabe es ist, bereits gefundene Exoplaneten zu charakterisieren, um so über die Entstehung von Planetensystemen, den Aufbau von Planeten und der Entstehung von Leben mehr zu erfahren.

8.1 PLATO

PLATO (**PL**anetary **T**ransits and **O**scillations of Stars) wurde erstmals 2007 als Mission für das Programm "Cosmic Vision" der ESA vorgeschlagen. Starten sollte die Mission ursprünglich 2017 bzw. 2018 - der Start wurde aber auf 2025 verschoben²¹.

PLATO ist eine follow-up Mission von CHEOPS, deren Ziel es ist, extrasolare Planetensysteme zu finden. Speziell liegt der Fokus auf erdähnliche Exoplaneten, welche in der habitablen Zone um sonnenähnlichen Zentralsternen liegen. Ein weiteres Ziel auf das PLATO ausgelegt wurde, ist es die seismischen Aktivitäten von Sternen zu messen, um aufgrund dieser Daten dann die Sterne charakterisieren zu können²².

Außerdem sollen auch Exoplaneten charakterisiert und in Gesteinsplaneten, Eisplaneten und Riesenplaneten eingeteilt werden, um neues Wissen über die Entstehung und den Aufbau von Planetensystemen zu gewinnen²³.

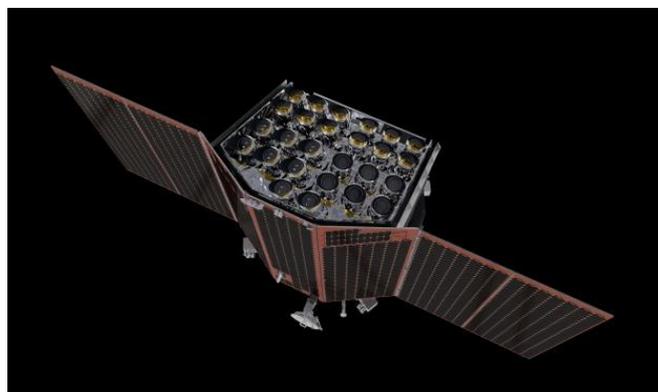
²¹ Vgl. PLATO Revealing habitable worlds around solar-like stars, Definition Study Report S.4

²² Vgl. ebd. S.13

²³ Vgl. ebd. S.9

Die Daten werden neben der Methode der photometrischen Messungen der Planetentransite auch durch eine, mindestens zwei Jahre andauernde, photometrischer Überwachung gewonnen. Die Massen der gefundenen Exoplaneten sollen durch bodengestützte Radialgeschwindigkeitsmessungen bestimmt werden, während die genauen Massen, Radien und das Alter der Sterne durch die Asteroseismologie (=Astroseismologie) bestimmt werden²⁴. Um das zu erreichen ist PLATO mit 24 normalen Kameras ausgerüstet, welche in 4 Gruppen unterteilt sind, wobei alle in Weitwinkel - Teleskope münden. Außerdem sind noch zwei Hochgeschwindigkeitskameras verbaut, welche für die Beobachtung heller Sterne und der Navigation verwendet werden²⁵.

PLATOs soll, wie schon erwähnt, 2025 (Stand 2019) in Kourou, Französisch-Guyana, starten und 6.5 Jahre in einem Orbit im Librationspunkt L2 (Lagrange Punkt) Daten sammeln. Die Position in diesem Lagrange Punkt erlaubt es dem Satelliten antriebslos und mit der gleichen Umlaufdauer, wie die der Erde, sich um die Sonne zu bewegen. Weiters verläuft die Abschirmung vor Sonnenstrahlung, auf Grund von der Position hinter der Erde, deutlich einfacher, als es in einem anderen Orbit der Fall wäre. Gebaut wurde PLATO für eine Einsatzzeit von 8 Jahren.



26

Abbildung 7: PLATO – Satellit

²⁴ Vgl. ebd S.10

²⁵ Vgl. ebd S.10

²⁶ PLATO- Satellit; URL: <https://sci.esa.int/web/plato/-/artist-s-impression-of-plato-2> [Stand: 19.2.2020]

8.2 ARIEL

ARIEL (**A**tmospheric **R**emote-sensing **I**nfrared **E**xoplanet **L**arge-survey) ist nach PLATO die vierte Mission des Cosmic Vision- Programmes der ESA. ARIEL soll 2026 von Kourou aus, wie auch PLATO, in einen Orbit um L2 gebracht werden, von wo aus der Satellit 500 - 1000 Exoplaneten untersuchen soll²⁷.

Das Ziel der Mission ist es, herauszufinden aus was Planeten bestehen und wie dieser Faktor mit der Formung des Planetensystems zusammenhängt.

Aus den Daten soll der Antwort auf die Frage, nach den benötigten Vorraussetzungen für Planetenentstehung und Entwicklung von Leben, nähergekommen werden. Daher wird versucht durch ARIEL Zusammenhänge zwischen Parametern des Planeten (Größe, Orbit und chemische Zusammensetzung) und dem Stern oder der Entstehung des Planetensystems zu finden²⁸.

Die Daten werden von ARIEL durch Transit - Spektroskopie und Schmalband Photometrie gesammelt, wobei der Fokus auf heißen Planeten gelegt wird, da in deren Atmosphäre die elementare Zusammensetzung (C, O, N, Si, S) leichter zu observieren ist.

Da der Fokus auf heißen Planeten liegt, arbeitet ARIEL sowohl im Bereich des sichtbaren Lichts als auch im Infrarotbereich.

Weiters sollen Wolken identifiziert, Sternaktivitäten überwacht und Moleküle in den Atmosphären der Exoplaneten entdeckt werden. Deshalb deckt der Wellenlängenbereich, in dem gesucht wird, die wichtigsten, der in der Planetenatmosphäre zu erwartenden, Gase ab (H₂O, CO₂, HCN, CH₄NH₃ und H₂S)²⁹.

²⁷ Vgl. ARIEL Assessment Study Report S.10

²⁸ Vgl. ebd. S.9

²⁹ Vgl. ebd. S. 9

Um diese Observierungen möglich zu machen, wurde eine besonders stabile Satellitenplattform mit einer sofortigen Wellenlängenabdeckung speziell entwickelt³⁰.

ARIEL soll also in der 4,5 Jahre langen Mission die chemische Zusammensetzung der Exoplaneten mit dem chemischen Umfeld des Zentralsterns in Verbindung bringen.



31

Abbildung 8: ARIEL: Satellit

³⁰ Vgl. ebd. S.9

³¹ ARIEL- Satellit; URL:

8.3 CHEOPS

Daten:

Startdatum: 2019

Größe: 2,6 m Höhe

Masse: 290 kg

Trägerrakete: Sojus-ST-B/Fregat

Hersteller: Airbus Defence and Space

Auftragnehmer: Arianespace

CHEOPS (**CH**aracterising **ExO**Planet **Sat**ellite) ist ein Gemeinschaftsprojekt der ESA mit österreichischer Beihilfe (IWF Graz). CHEOPS ist die erste Mission, welche dafür ausgelegt wurde, nahe, helle Sterne und ihre Exoplaneten zu untersuchen und charakterisieren. Die zu untersuchenden Sterne wurden aber nicht nur nach dem Vorhandensein von Exoplaneten ausgewählt, sondern sollen auch, um die besten Messergebnisse zu bekommen, möglichst hell und gleichzeitig eine geringe Sternaktivität haben. Der Start fand an Stelle des geplanten Startes am 18.12.2019 statt und wurde somit, auf Grund von Softwareproblemen, kurzfristig um einen Tag verschoben.

Die Zielsetzung der Mission ist es Exoplaneten mit einer Umlaufdauer von 50 oder weniger Tagen und mit einer Größe, welche zwischen der, einer Supererde (5-10 Erdmassen) und der des Neptuns liegt, zu untersuchen. Das Besondere ist es, dass die Aufgabe der CHEOPS-Mission nicht darin liegt neue Exoplaneten zu finden, sondern primär, bereits entdeckte zu charakterisieren. Dabei soll zwischen Gasriesen, Gesteinsplaneten und Planeten mit einer Wasseroberfläche unterschieden werden. Dadurch sollen Exoplaneten auf eine mögliche Atmosphäre untersucht werden, so dass zukünftige Missionen gezielt, die von CHEOPS analysierten Exoplaneten, weiter auf Leben untersuchen können. Weitere Ziele der Mission sind es, einerseits ein besseres Verständnis über die Entstehungen von Planeten - Atmosphären und deren Auswirkungen auf einen Planeten, auf Grund von Sternparametern, zu erlangen und die Massen und Radien ausgewählter Exoplaneten in Erdnähe so präzise wie noch nie zu bestimmen, um diese untersuchten Exoplaneten für kommende Missionen als Zielproben verwenden zu können³².

³² Online im www unter URL: <https://cheops.unibe.ch/cheops-mission/executive-summary/>

Die Datenermittlung geschieht nach dem Prinzip der Transitmethode. Ein Teleskop mit einer Öffnung von 32 cm und einer Länge von 1,2 m, wird durch hochpräzise Photometrie Transite von Exoplaneten beobachten. Die gewollte Präzision soll durch einen CCD - Sensoren (charge - coupled device) erreicht werden. Das Teleskop ist im Ritchey - Chretien Stil gebaut, welches außerdem das Streulicht minimiert³³.

Durch den Einsatz von Solarpanelen und einem Sonnenschild soll verhindert werden, dass das Teleskop und die Radiatoren überhitzen.

Das ist daher nötig, da CHEOPS in einen 650 - 800 Kilometer weiten, sonnensynchronen Orbit gebracht wird. Dadurch soll die mindeste Einsatzzeit der CHEOPS - Mission 3,5 Jahre betragen. CHEOPS wird voraussichtlich mit der Aufnahme der Datenerhebung Mitte März 2020 beginnen können.



34

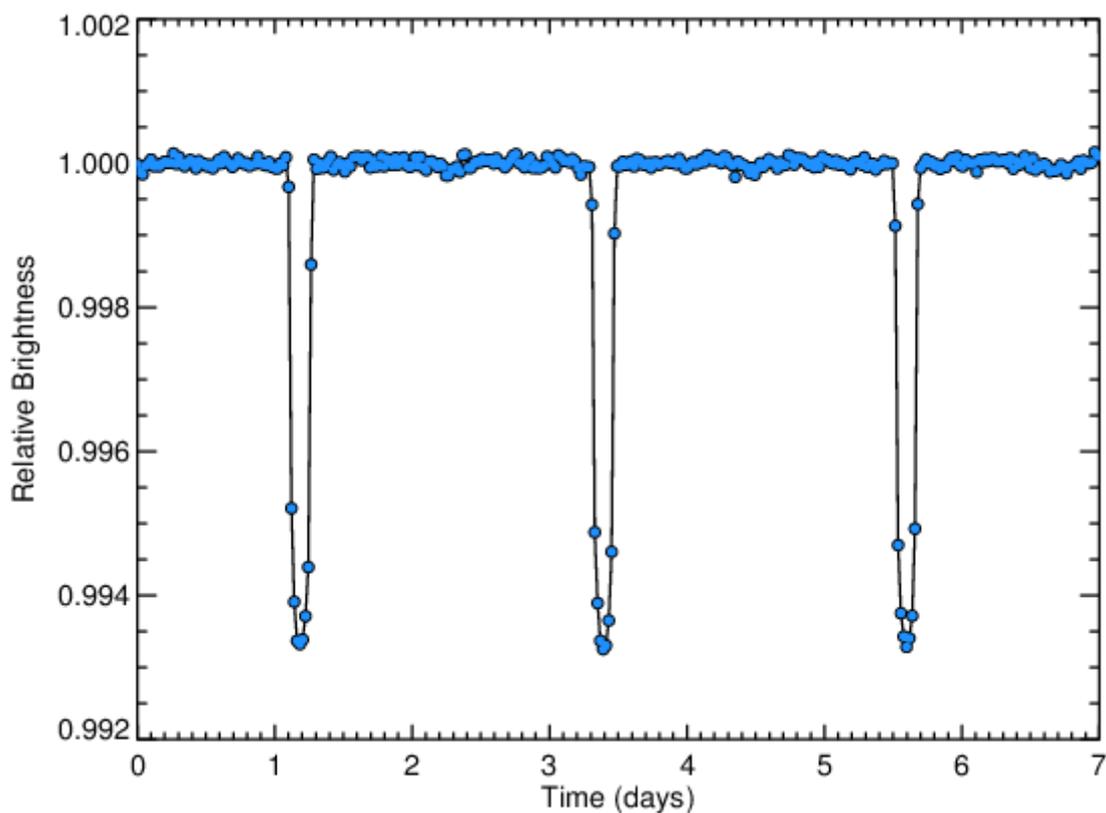
Abbildung 9: CHEOPS-Satellit

³³ Online im www unter URL: <https://cheops.unibe.ch/cheops-mission/executive-summary/>

³⁴ CHEOPS- Satellit; URL: <https://infothek.bmvit.gv.at/assets/uploads/2019/12/cheops1.jpg> [Stand: 19.2.2020]

9 Auswertung und Interpretation einer Transitmessung

In diesem Kapitel werde ich eine Lichtkurve von Planetentransite analysieren. Dabei werde ich auf die Möglichkeit für das Vorhandensein eines Exoplaneten eingehen. Als Beispiele dienen, bereits als Graph dargestellte, Messdaten der Keplermission.



35

Abbildung 10: Lichtkurve des Sterns HAT-P-7

In dem oberen Graphen ist die relative Helligkeit gegenüber der vergangenen Zeit dargestellt. Dabei wird die Helligkeitsveränderung während des Transits innerhalb eines Prozentes der Gesamthelligkeit des Sterns angegeben, die Zeit ist in Tagen dargestellt.

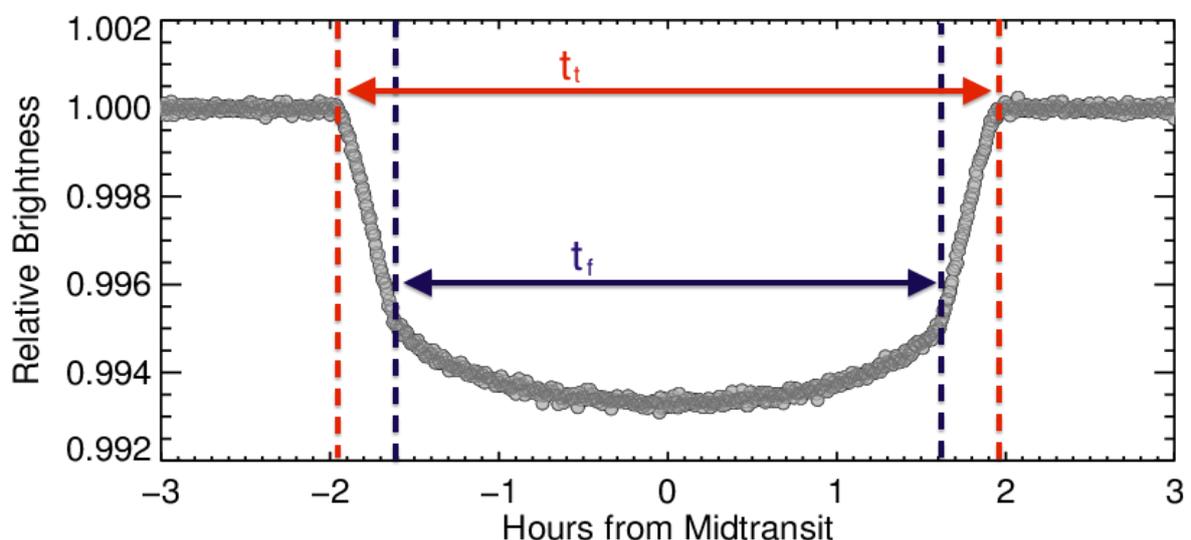
Es fallen drei Einsenkungen der Helligkeit des Sterns auf. Die Höhepunkte erreichen sie nach 1,2; 3,4 und nach 5,6 Tagen. Daraus ergibt sich eine periodische Wiederholung des Helligkeitsverlusts alle 2,2 Tage.

³⁵Online im www unter URL: <https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial2.html>

Auch die Stärke des Helligkeitsverlust (Transittiefe) spielt eine Rolle. Wenn der Radius des Sterns bekannt ist, kann man mit der hier gezeigten Formel, den Radius des umkreisenden Körpers berechnen.

$$R_p = R_\star \sqrt{\text{Depth}}$$

In unserem Fall würde sich dieser Radius, bei einem Sternradius von 2 Sonnenradien³⁶, auf circa 1,66 Jupiterradien (~ 18 Erdradien) belaufen. Wichtig ist, darauf zu achten, dass die Verringerung (ca. 0,007) eingesetzt wird.



³⁷Abb. 11: Lichtkurve HAT-P-7b

In dieser Abbildung sind die gleichen Daten in „Hours from midtransit“, also in Stunden seit der höchsten Transittiefe, dargestellt. Bei einem Transit gibt es zwei verschiedene Wege, die Transiddauer anzugeben. Es wird zwischen t_t (total duration) und t_f (full duration) unterschieden.

Von t_t wird der Zeitraum beschrieben, ab dem ein Objekt vor den Stern wandert, bis zu dem Zeitpunkt, wenn das Objekt den Stern nicht mehr abdeckt.

Im Gegensatz dazu beschreibt t_f nur den Zeitraum, in dem ein Körper mit vollständigem Ausmaß vor dem Stern liegt.

³⁶ Vgl. online im www unter URL: http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-7_b/

³⁷ Online im www unter URL: <https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial2.html>

Aus dem Verhältnis dieser zwei Parametern, der Transittiefe und anderen Faktoren kann darauf geschlossen werden wie zentral die Bahn des Körpers während des Transits, am Stern verläuft.

Weiters kann man in Abbildung 10 die zweiten Minima erkennen. Sie liegen mittig zwischen zwei Haupttransiten und kommen sich periodisch - wiederholend, vor. Diese entstehen, wenn ein Objekt hinter dem Stern verschwindet, da dadurch die Strahlung des Körpers vom Stern verdeckt wird. Da diese Strahlung in der Regel sehr gering ist, ist nur eine kleiner Helligkeitsverlust zu bemerken.

10 Ergebnis und Diskussion

Vieles des in Abbildung 10 dargestellten Helligkeitsverlaufes des Sterns HAT-P-7 deutet auf das Vorhandensein eines Exoplaneten hin. Es ist ein eindeutig periodisch - wiederkehrender, gleichbleibender Helligkeitsverlust zu sehen, was am wahrscheinlichsten durch einen Planeten verursacht wird. Weiters würden auch der errechnete Radius, die Umlaufdauer und die Form des Transits auf einen Planeten hinweisen.

Tatsächlich ist in dieser Helligkeitskurve ein Exoplanet zu sehen. Die Transitmessung stammt aus dem Jahr 2008 und wurde vom Kepler - Weltraumteleskop gemessen. Es sollte damals, nach Vermutungen auf einen Exoplaneten, unter anderem auch der Stern HAT-P-7 untersucht werden.

Dabei wurde dessen Exoplanet HAT-P-7b bestätigt.

Bei HAT-P-7b handelt es sich um einen „heißen Jupiter“ (ähnliche Masse wie Jupiter – aber mit deutlich höherer Oberflächentemperatur) mit einer Masse von circa 1,741 Jupitermassen (56,46 Erdmassen) und einem Radius von 1,431 Jupiterradien (16 Erdradien).

Die Entfernung zu seinem Mutterstern beträgt im Durchschnitt 0,0377 AE. Aufgrund von seiner hohen Masse und der geringen Umlaufdauer wird angenommen, dass es sich um einen Gasplaneten handelt³⁸.

HAT-P-7b war einer der ersten Exoplaneten, welche durch die Kepler - Mission entdeckt bzw. bestätigt werden konnten. Das liegt daran, dass es sich um einen heißen Jupiter handelt, welche im Allgemeinen auf Grund ihrer Größe und geringen Umlaufdauer, sowie auch die damit verbundenen, hohe Oberflächentemperatur, zu den am leichtesten nachweisbaren Planetentypen gehören.

³⁸ Vgl. online im www unter URL: http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-7_b/ [Stand: 24.2.2020]

Fazit:

Das Erkennen von Exoplaneten in einer Messkurve ist, wie man gesehen hat, mit der Transitmethode sehr einfach, solange die Helligkeitsänderungen auf einem Prozentteil der Gesamthelligkeit des Sterns eingetragen sind.

Gerade bei einem heißen Jupiter, wie es in diesem Beispiel einer war, sind die Helligkeitseinbrüche sehr gut erkennbar.

Die Charakterisierung eines Exoplaneten verläuft deutlich komplizierter. Zum einen müssen die Daten des Muttersterns bekannt sein, welche meist sehr schwierig herauszufinden sind.

Diese Werte sollten auch möglichst präzise sein, um die Daten der Exoplaneten richtig zu berechnen.

Trotzdem kann man schon mit einer simplen Rechnung und, vom Graphen abgelesene Werte, eine akzeptable Genauigkeit in der Bestimmung des Radius eines Planeten erreichen.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrum mit Rot- Blauverschiebung	11
Abbildung 2: Stern (A) mit Objekt (b)	12
Abbildung 3: Microlinseneffekt	14
Abbildung 4: Sternspektrum mit Fraunhofer'sche Linien	16
Abbildung 5: Helligkeitskurve mit Einbruch	17
Abbildung 6: Limb darkening (Sonne mit Venus)	17
Abbildung 7: PLATO: Satellit	20
Abbildung 8: ARIEL: Satellit	21
Abbildung 9: CHEOPS-Satellit	23

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffserklärung	6
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Suchmethoden.....	18

13 Literaturverzeichnis

Brett C. Addison, Samuel T. Durrance, Edward W. Schwieterman: Modeling and Observing Extrasolar Planetary Transits; February 2010

Büker, Michael (2013): Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismethoden/>
[Stand: 18.12.2019]

CHEOPS: CHEOPS- Characterising ExOPlanets Satellite. URL: <https://cheops.unibe.ch/cheops-mission/executive-summary/>
[Stand: 26.2.2020]

Debra A. Fischer, Andrew W. Howard, Greg P. Laughlin, Bruce Macintosh, Suvrath Mahadevan^{5,6}, Johannes Sahlmann, Jennifer C. Yee: Exoplanet Detection Techniques. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.06869.pdf>
[Stand: 20.9.2020]

ESA Science and Technology (2017): ARIEL Assessment Study Report. URL: https://sci.esa.int/documents/34375/36249/1567260310680-ESA_SCI-2017-2_ARIEL.pdf
[Stand: 22.2.2020]

ESA Science and Technology (2017); ARIEL Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey. Enabling Planetary Science across Light-years. URL: <https://ariel-spacemission.files.wordpress.com/>
[Stand: 22.2.2020]

ESA Science & Technology (2019): CHEOPS. Sizing and first characterisation of Exoplanets. URL: https://sci.esa.int/documents/34122/36173/1567260383327-ESA_BR-342_CHEOPS.pdf
[Stand: 24.2.2020]

ESA Science and Technology: PLATO Revealing habitable worlds around solar-like stars. Definition Study Report. URL: https://sci.esa.int/documents/33240/36096/1567260308850-PLATO_Definition_Study_Report_1_2.pdf
[Stand: 4.1.2020]

Exoplanet.eu: The Extrasolar Planets Encyclopaedia. URL: http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-7_b/
[Stand: 25.2.2020]

IWF Institut für Weltraumforschung. URL: <https://www.iwf.oeaw.ac.at/forschung/forschungsfelder/exo-planetenphysik/exoplaneten/>
[Stand: 20.12.2019]

Janjic, Aleksandar: Lebensraum Universum. Einführung in die Exoökologie. Berlin: Springer 2017

J.-L.Beuzit, D.Mouillet, B.R.Oppenheimer, J.D.Monnier: Direct Detection of Exoplanets. URL: http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/reading/ppv_preprints/sec7-9.pdf
[Stand: 12.1.2020]

Leifi Physik (2019): URL: <https://www.leifiphysik.de/optik/wellenmodell-des-lichts/versuche/rot-und-blauverschiebung>
[Stand: 24.2.2020]

Mackowiak, Bernhard: Die Erforschung der Exoplaneten. Auf der Suche der Schwesterwelten des Sonnensystems. Kosmos 2015

Neumann, Fabian: Das Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode als Technik zur Entdeckung extrasolarer Planeten. Facharbeit 2012

Perryman, Michael: The Exoplanet Handbook; 2011

Huber, Daniel: Synergies Between Asteroseismology and Exoplanetary Science. Facharbeit 2017

Vanderburg, Andrew: Transit Light Curve Tutorial. URL: <https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial2.html>
[Stand:25.02.2020]

Welt der Physik (2013): URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/>
[Stand: 10.8.2019]

14 Selbstständigkeitserklärung