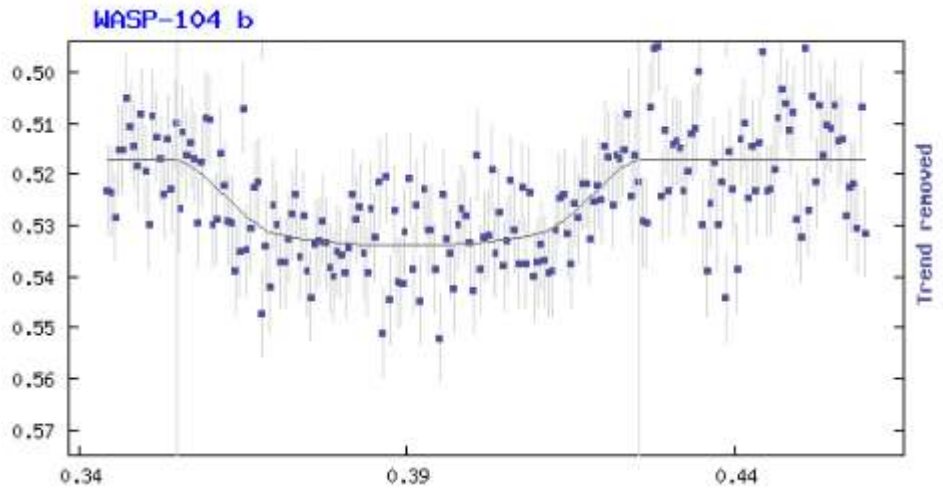
Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Wuppertal

Jahrgangsstufe Q1 / 11
Schuljahr 2018/2019

Facharbeit im Leistungskurs Physik

Exoplaneten – Ferne Welten jenseits unseres Sonnensystems



Verfasser: David Oelmann (Tel. 0202 / 47 77 64)
Kursleiter: Michael Winkhaus
Mit Unterstützung von: Bernd Koch

Abgabetermin: 29.03.2019

Gliederung

1. Einleitung 3

2. Was ist ein Planet? 4

2.1. Definition Planeten 4

2.2. Entstehung von Planeten 5

2.3. Planetenklasse und Aufbau 6

3. Entdeckungsmethoden 8

3.1. Transitmethode 8

3.1.1. Benötigte Ausrüstung 8

3.1.2. Auswertung 9

3.1.3. Beispiel Kepler-22b 9

3.2. Radialgeschwindigkeitsmethode 10

3.2.1. Beispiel 51 Pegasi b 11

3.3. Direktes Foto 11

3.3.1. Beispiel Fomalhaut b 12

3.4. Microlensing 12

3.5. Astrometrie 13

4. Nachweis eines Exoplaneten am Schülerlabor Astronomie 14

4.1. Vorbereitung einer Transitaufnahme 14

4.2. Messung eines Transits 16

4.3. Der Zielstern WASP-104 17

4.4. Auswertung des Transits von WASP-104b 17

4.5. Bestimmung der Parameter von WASP-104b 20

5. Abschließende Betrachtung 24

6. Literaturverzeichnis 25

7. Bildverzeichnis 27

Abschlusserklärung 28

1. Einleitung

Vor circa 4,6 Milliarden Jahren begann im Weltraum eine Scheibe aus Staub und Gasen sich zu verändern. In etwa 27.000 Lichtjahren Entfernung zum Zentrum der Milchstraße ereignet sich ein einmaliges Spektakel: Die Scheibe verwandelt sich in diverse Himmelskörper verschiedener Größen. Im Zentrum entsteht eine Sonne, die später 8 Planeten und unzählige Monde, Zwergplaneten und viele andere Kleinstplaneten in ihrem Orbit hat. Diese Objekte sind alle einzigartig, doch einer verbirgt etwas ganz besonderes. Die Rede ist von unserem Zuhause, von der Erde. Sie ist der dritte Planet in unserem Sonnensystem und der einzige zurzeit bewohnbare Planet. Über Milliarden von Jahren hinweg entwickelte er sich zu unserer Heimat, nicht zuletzt wegen der optimalen Distanz zur Sonne, die es erlaubt, dass Wasser in flüssiger Form auf der Erde existieren kann. Im Laufe der Evolutionsphase entstanden, aber auch verschwanden zahlreiche Lebewesen von der Erde. Auch der Mensch kam aus dieser Entwicklung hervor. Und nun bevölkern wir hier seit einigen Jahrtausenden diesen Planeten und erzielen immer mehr Erfolge und Errungenschaften. Man arbeitet für den bestmöglichen Lebensstil, unser Handeln ist komplett dem Ziel des Reichtums gewidmet, ohne Rücksicht auf die Erde. Selbst wer sich mit unserem Sonnensystem auch nur ein bisschen auseinandergesetzt hat, weiß, dass sie einzigartig ist. Sie ermöglicht es, zahlreichen Lebewesen zu leben. Unabhängig davon hat bestimmt jeder von uns abends einmal in den Nachthimmel gesehen und sich gefragt, was liegt da draußen? Gibt es noch andere Planeten, vielleicht sogar welche, die der Erde ähnlich sind? Diesen Fragestellungen werde ich in dieser Facharbeit nachgehen und mögliche Antworten geben. [1]

2. Was ist ein Planet?

Die Sternkunde war schon sehr früh Begleiter unserer Vorfahren. Dokumentationen durch Höhlenmalerei belegen, dass der Mensch bereits vor rund 18.000 Jahren begonnen hat sich mit den Geschehnissen am Himmel auseinanderzusetzen. Es ist also ein Thema, das uns anscheinend schon lange begleitet und viele Fragen bereitet. Spätestens mit der Erfindung des Fernrohrs wurde das Erforschen des Nachthimmels populär. Mit der Astronomie wurden Personen wie Galileo Galilei, Johannes Kepler oder Edwin Hubble weltberühmt. Über Jahrhunderte hinweg wurden immer Himmelskörper entdeckt, jeder wurde als Planet angesehen. Die Zahlen stiegen immer weiter, hauptsächlich mit Entdeckungen in unserem Sonnensystem. [2],[3],[4]

2.1 Definition Planeten

Doch ab wann darf man nun ein Objekt im Universum als Planet bezeichnen? Diese Frage versuchten 2006 einige Wissenschaftler der sog. IAU (International Astronomical Union) zu beantworten. Dabei legten sie folgende Kriterien fest:

Ein Himmelskörper gilt als *Planet*, wenn …

… er sich auf einer Bahn um die Sonne befindet.

… er ausreichend Masse für eine runde Form und eigene Gravitation besitzt.

… er eine bereinigte Umlaufbahn vorweist, also das einzige Objekt ist, dass auf dieser Umlaufbahn kreist.

… er kein Mond ist (er würde dann sowohl um die Sonne als auch um einen Planeten kreisen).

Wenn ein Objekt nun in einem dieser Punkte von der Definition abweicht, wird es anders definiert (die folgenden Darstellungen weichen in einem der vier Kriterium von der Vorgabe ab): Hat ein Objekt …

… keine bereinigte Umlaufbahn, wird es als *Zwergplanet* bezeichnet.

… einen anderen Stern als Zentrum seiner Umlaufbahn, wird dieses als *Exoplanet* bezeichnet.

… keinen Stern, um den es kreist, spricht man hier von *vagabundierenden Planeten*.

… eine Masse, die 13 Mal oder noch größer ist als die des Jupiters, fällt dieses in die Kategorie der *braunen Zwerge*.

… jedoch eine zu geringe Masse, wird er im allgemeinen als *SSSB* (Small Solar System Bodies) bezeichnet. Dazu gehören *Kleinplaneten*, *Kometen*, *Asteroiden* oder *Meteoriden*. [4],[5],[6]

2.2 Entstehung

Über die genaue Art und Weise der Entstehung eines Planeten sind sich Forscher zur Zeit noch im Unklaren. Fest steht jedoch, dass die Grundvoraussetzung für die Entstehung eines neuen Sternensystems eine rotierende Scheibe aus Gas und Staub ist. Eine der populärsten Theorien zur Entstehung eines solchen Systems besagt folgendes: „Zu Beginn der planetaren Entwicklung müssen innerhalb der Scheibe ausgedehnte Kondensationsprozesse stattgefunden haben, in denen sich Gas am Staub anlagerte, wodurch die Größe der Staubkörner allmählich wuchs und die *Planetesimale* entstanden. Ein Teil der Staubkörner verdampfte zwar aufgrund von Stößen mit anderen Körpern und besonders aufgrund des Einflußes der Strahlung der *Protosonne*, insgesamt überwog aber die Kondensation. Modellrechnungen zeigen, [dass] u.a. durch Stöße auch eine Gleichverteilung der kinetischen Energie in der Gaswolke erreicht werden kann, durch die bestehende Staubkörner überproportional schnell wachsen.“ [1]

Nachdem die Entwicklung von Himmelskörpern eingesetzt hatte, vergingen ungefähr 100.000 Jahre, bis aus den Staubkugeln etwa mondgroße Objekte entstanden. Ein Teil dieser Massen sammelte nun im Laufe der nächsten 1.000.000 Jahre Gaswolken auf, es entstanden folglich Gasplaneten. Andere hingegen wuchsen weiter und wurden, Schätzungen zu Folge, nach 10.000.000 – 100.000.000 Jahren zu Gesteinsplaneten. Im Laufe der Entwicklung kam es immer wieder zu Kollisionen zwischen den wachsenden Körpern, aus denen u.a. auch Monde entstehen konnten, wie beispielsweise der Erdmond, der durch eine solche Kollision entstanden sein soll. [1],[6],[7],[8],[9]

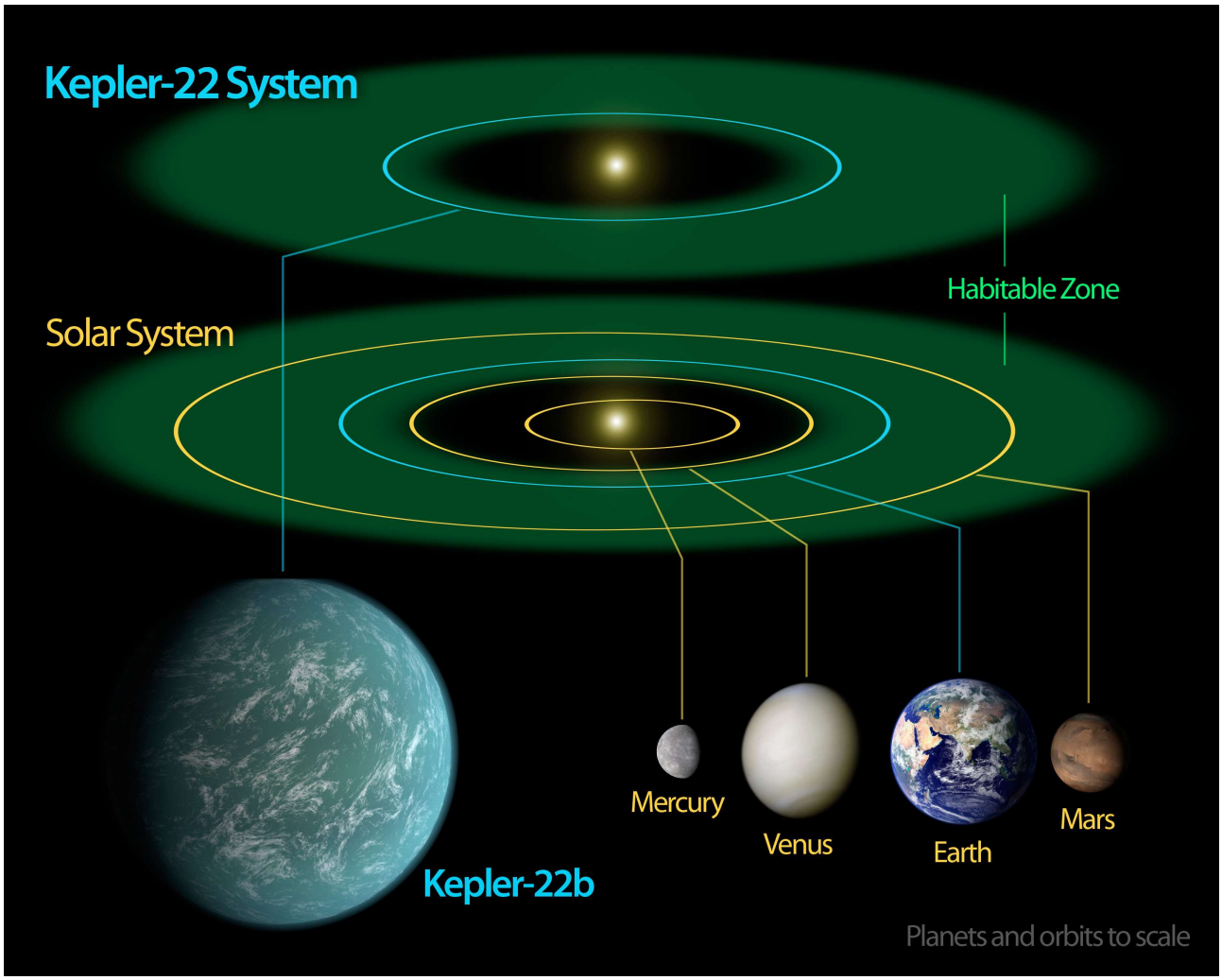
Im Jahr 2008 stellte eine Entdeckung diese Entstehungstheorie in den Schatten, als das Objekt TYC 8241, eine Staubscheibe in rund 456 Lichtjahren Entfernung (1983 entdeckt), sich verwandelte. In einem Zeitraum von nur 8 Monaten nahm die Temperatur, die ursprünglich bei 180°C lag, um 60% ab. In der gleichen Zeit entstand ein neuer Stern im Zentrum der Scheibe, ein Bruchteil des bisher angenommenen Zeitraums. Im Jahr 2010 verschwand der Nebel komplett. Hierfür nimmt man zwei mögliche Ursachen an. Entweder wurde der Staub durch die Strahlung des Sterns aus dem System gedrängt oder die Entstehung von Planeten geschieht weitaus rasanter als gedacht. [7]

Letztlich kann man bis heute keine einheitliche Begründung über Entstehungszeitraum und -grund von Planeten aufstellen.

2.3 Planetenklassen und Aufbau

Planeten werden meist in die Typen *Gesteinsplaneten* (*terrestrisch*) und *Gasriesen* (*jovianisch*) eingeteilt, doch es gibt zwei weitere Arten einen Planeten zu klassifizieren. Beide sind nicht definiert nach der Oberfläche des Planeten, sondern zum einen nach Gewicht und Größe eines Objektes, zum anderen nach der Entfernung zu ihrem Stern. [10]

Planeten mit einer Größe von bis zu 1,5 Erdradien und 5 Erdmassen werden als *erdähnlich* bezeichnet. Liegt der Radius jedoch zwischen 1,5 und 2,5 Erdradien und die Masse bei dem 5 bis 10fachen der Erde, so ist die Rede von *Supererden*. Die folgende Kategorie sind die *neptunähnlichen* Planeten, sie umfassen eine Masse von 10 bis hin zu 50 Erdmassen und sind max. 6 Mal so groß wie die Erde. Alle Himmelskörper, die dies übersteigen, sind als *jupiterähnlich* klassifiziert. [10]



Bild[1]: Vergleich der habitablen Zone des Systems Kepler-22 mit jener unseres Sonnensystems

Dann gibt es noch die Unterscheidung hinsichtlich der Oberflächentemperatur. Hierzu wird der Sternorbit in drei Zonen eingeteilt: warme, habitable und kalte Zone (Bild[1]). Als Kriterium für die Einteilung gilt der Aggregatzustand von Wasser auf der Oberfläche. Nur in der habitablen Zone ist es möglich, dass Wasser in flüssiger Form auftritt. Die habitable Zone lässt sich durch folgende Formel ermitteln: $R=\sqrt{L_{St}/L_{So}}$ [11]

R: Radius in astronomischen Einheiten (Distanz Erde – Sonne; ~ $1{,}496*10^8$ km);

L_{st}: Leuchtkraft des Sterns;

L_{so}: Leuchtkraft unserer Sonne.

Planeten, die zwischen Stern und habitabler Zone liegen, werden als *hot* eingestuft. Liegt ein Planet in dieser habitablen Zone, wird er als *potentiell bewohnbar* eingeordnet. Die letzte Kategorie sind die als *cold* bezeichneten Planeten außerhalb der habitablen Zone. [11]

Auch die Planetenatmosphäre ist bei den beiden uns bekannten Planetentypen (Gas- und Gesteinsplanet) unterschiedlich. Jedoch ist an dieser Stelle anzumerken, dass für die folgende These nur die 8 Planeten unseres Sonnensystems betrachtet wurden. Auf der einen Seite existieren die terrestrischen Planeten mit viel Stickstoff und Kohlendioxid in der Atmosphäre, ein paar weisen auch Spuren von Sauerstoff und Argon in ihrer Atmosphäre auf, die Ausnahme bildet hier die Erde, die einen relativ hohen Sauerstoffanteil hat. Auf der anderen Seite existieren die jovianischen Planeten, die alle eine Atmosphäre besitzen, die größtenteils aus Wasserstoff, Helium und Methan besteht. [12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19]

Aus all den obigen Parametern zur Klasseneinteilung der Planeten lassen sich auch die Bedingungen für einen erdähnlichen und potentiell bewohnbaren Planeten aufstellen.

Dafür sollte der Planet als erdähnlich eingestuft und ein Gesteinsplanet sein. Ein weiteres Kriterium ist die Lage in der habitablen Zone, um flüssiges Wasser zu ermöglichen, was die Grundvoraussetzung zur Existenz jeder, uns bekannter, Lebensform darstellt. Als letzter Punkt muss nur noch eine sauerstoffreiche Atmosphäre vorhanden sein. [20]

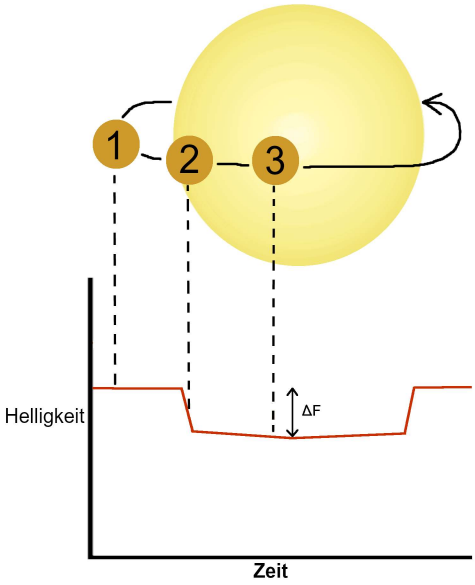
3. Entdeckungsmethoden

Um einen extrasolaren Planeten nachzuweisen oder sogar zu entdecken, gibt es diverse Methoden. Die Meisten dieser Methoden setzen sich mit der Analyse des Lichts auseinander, vor allem auf große Distanzen. Auf kürzeren Distanzen lassen sich Planeten über die variierende Distanz zwischen ihrem Zentralstern und anderen Sternen, teilweise auch mit direkten Fotos, nachweisen. Neben der Distanz spielt auch die Bahnneigung eines Objektes eine Rolle, welche Methode einen Nachweis ermöglicht. Im folgendem werde ich einige der gängigsten, aber auch außergewöhnlichsten Methoden erläutern. [21]

3.1. Transitmethode

Die sog. Transitmethode ermöglicht es, Planeten durch Helligkeitsschwankungen eines Sterns zu entdecken. Hierbei richtet man zum Beispiel ein Teleskop auf einen Stern aus. Die Entdeckung läuft dann wie folgt ab:

Zuerst bewegt sich ein Planet auf seiner natürlichen Umlaufbahn (siehe Bild[2] [Pos. 1]). Auf seiner Umlaufbahn schiebt er sich nun zwischen seinen Stern und den Beobachter (siehe Bild[2] [Pos. 2]), die gemessene Helligkeit des Sterns sinkt.Im Folgenden passiert der Planet das Sichtfeld des Sterns (siehe Bild[2] [Pos. 3]), die Verdunklung des Sterns erreicht ihr Maximum.



Bild[2]: Vergleich von Transitposition und Helligkeit des Sterns

Die Messung endet damit, dass der Planet das Sichtfeld wieder verlässt. Die Bewegung des Planeten zwischen Stern und Betrachter wird als *Transit* bezeichnet. [22],[23]

3.1.1. Benötigte Ausrüstung

Für eine Transit-Aufnahme wird vor allem ein Teleskop benötigt; die Größe von diesem ist abhängig von dem zu untersuchenden Stern: je weiter er entfernt ist, desto größer muss das Teleskop sein. Um die Helligkeit der anvisierten Sterne zu messen, wird ein Kamerasensor angeschlossen, welcher auf eine Temperatur von -35°C gekühlt wird. Die Auswertung erfolgt über spezielle Software.

3.1.2. Auswertung

Die Transitmethode bietet das größte Spektrum an ermittelbaren Daten. Sofern die benötigten Parameter bekannt sind, lassen sich wichtige und interessante Informationen wie beispielsweise der Planetenradius, der Radius der Umlaufbahn, Umlaufzeit und auch Oberflächentemperatur bestimmen.

Der *Planetenradius* (R_P) lässt sich wie folgt berechnen: $R_P = R_S * \sqrt{\Delta F}$ [23],
wobei R_S der Radius des Sterns und ΔF die Helligkeitsabweichung ist.

Die *Umlaufzeit* (T_P) des Planeten lässt sich durch eine kontinuierliche Beobachtung des Sterns ermitteln. Dafür werden mindestens zwei Transits benötigt. Wenn alle Messungen die gleiche Kurve aufweisen und die Abstände zwischen den Transits konstant waren, kann man nun einfach aus dem zeitlichen Abstand ablesen, wie lange der Planet für einen Umlauf braucht.

Wenn die Masse des Sterns (M_S) bekannt ist, lässt sich mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes und der Gravitationskonstante (G) die *große Bahnhalbachse* (a) in AE (astronomische Einheit, Distanz von der Sonne zur Erde ~149 597 900 km) bestimmen:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G * M_S * T_P{}^2}{4 * \pi^2}}$$ [24],[25]

Mit den folgenden Werten lässt sich die *durchschnittliche Temperatur* (T in K) an der Oberfläche bestimmen:

- η: Energieverlust durch Lichtreflektion
- d: Distanz zwischen dem Objekt und seinem Stern
- σ: die sog. *Stefan-Boltzmann-Konstante* ($5{,}67.10^{-8}$ W/(m²K⁴))
- L: Leuchtkraft des Sterns in J/s

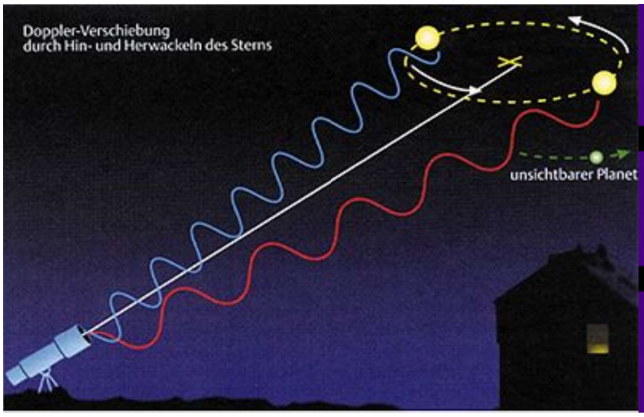
Die Formel für T lautet wie folgt: $T = \sqrt[4]{\frac{(1-\eta) * L}{16 * \pi * d^2 * \sigma}}$ [26]

3.2.3. Beispiel

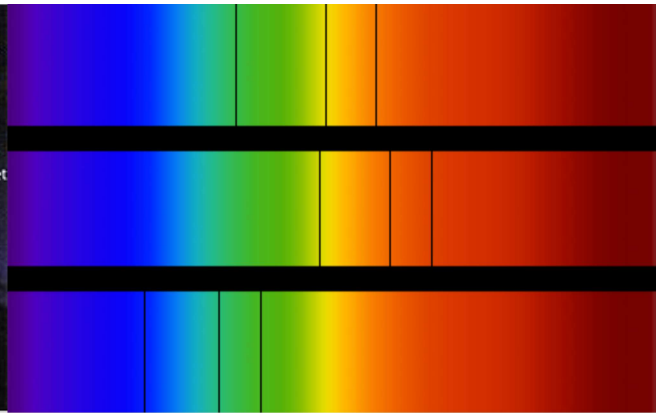
Das vielleicht bekannteste Beispiel für einen Exoplaneten, der über die Transitmethode entdeckt wurde, ist Kepler-22b. Dieser wurde erstmals 2009 vom Kepler Teleskop

gesichtet, 2010 wurde er offiziell bestätigt. Er liegt im 600 Lichtjahre entfernten Kepler-22-System. Was ihn so besonders macht, sind seine Eigenschaften: er hat einen Durchmesser von 2,4 Erdradien und eine durchschnittliche Oberflächentemperatur von 22°C, aufgrund seiner Lage in der habitablen Zone. Da seine Masse bisher nicht bekannt ist, lässt sich der Planet nicht in eine Planetenklasse einordnen. Zum Zeitpunkt seiner Entdeckung wurde er als die „Super-Erde“ angesehen. [27],[28]

3.2. Radialgeschwindigkeitsmethode



Bild[3]: Dopplerverschiebung im Laufe der Rotation



Bild[4]: Dopplerverschiebung des Lichts im Lichtspektrum

Die Radialgeschwindigkeitsmethode baut darauf auf, dass ein Stern und ein Planet um einen gemeinsamen Massenschwerpunkt kreisen (Bild[3]). Dieser Schwerpunkt liegt – bedingt durch die hohe Sternmasse - meistens sehr nahe am eigentlichen Mittelpunkt des Sterns. Durch die Bewegung des Sterns um den Massenschwerpunkt, auch Radialbewegung genannt, ist im Licht ein Effekt zu erkennen, den wir als Dopplereffekt kennen (Bild[4]). Bewegt der Stern sich auf uns zu, werden kürzere Wellenlängen gemessen, bewegt er sich wieder von uns weg, werden die Wellenlängen länger. Diese Veränderungen sind aus dem Lichtspektrum abzuleiten, dort ist die Verkürzung durch eine Blau-Verschiebung, die Verlängerung durch eine Rot-Verschiebung zu erkennen (siehe Abbildung, extrem dargestellt).[29],[30]

Der einzige Wert, der sich mit der Radialgeschwindigkeitsmethode ermitteln lässt, ist die minimale Masse, die der Exoplanet aufweisen muss, um das Licht auf diese Weise zu verschieben. Um den Wert zu errechnen, braucht man die Keplerschen Gesetze. [30]
Die Methode weist jedoch einige Schwächen auf, wenn die Anzahl an Planeten im jeweiligen Sternensystem relativ hoch ist, dann nimmt die Radialgeschwindigkeit eine nicht

regelmäßige Form an, da mehrere Massen die Bewegung des Sterns beeinflussen. Letztendlich ist dann nur noch die Summe der einwirkenden Kräfte im Lichtspektrum zu messen.

3.2.2. Beispiel

Der erste Planet, der mit dieser Methode nachgewiesen wurde, war *51 Pegasi b* (auch bekannt unter *„Dimidium“* oder *„Bellerophon“*). Dieser wurde 1995 von Schweizer Professoren an der Universität Genf nachgewiesen. Seine Entdeckung brachte einige Neuerungen; er war der erste entdeckte Planet außerhalb des Sonnensystems und somit auch der erste Planet, der als *Hot Jupiter* eingestuft wurde.
Der Planet umkreist den Stern *51 Pegasi* (auch *„Helvetios“*) im Sternbild Pegasus. Sein mittlerer Bahnradius beträgt ~ 0,052 AE (7.779.089,3 Kilometer), die Dauer einer Periode beläuft sich auf 4,23 Erdentage. Messungen ergaben, dass er einen Radius von beinahe 1,9 Jupiterradien hat, seine Masse jedoch weniger als die Hälfte der Jupitermasse ist. [31]

Seit 2003 wird von einem bodengestützten VLT-Teleskop in Chile unter dem Namen HARPS mit der Radialgeschwindigkeitsmethode nach Exoplaneten gesucht. Dieses zeichnet sich besonders durch seine hohe Genauigkeit aus, mit einer Abweichung von nur 1m/s erfasst es die Radialbewegung der Sterne. Es wird von der *ESO* (*E*uropean *S*outhern *O*bservatory) betrieben. Bekannt wurde das Projekt vor allem in der Erforschung des Sternsystems um HD 10180. Mit sechs bestätigten und einem unbestätigten Planeten zählt es zu den planetenreichsten Sternsystemen, die bisher erforscht wurden. Die Liste der Entdeckungen hat mittlerweile über 150 Einträge. [32],[33]

3.3. Direktes Foto

Das direkte Fotografieren eines Planeten erfolgt mit äußerst großen Teleskopen (VLT). In regelmäßigen Abständen werden Nahaufnahmen von einem Sternsystem gemacht. Potenzielle Planeten sind auf den Aufnahmen als helle Punkte zu sehen, bewegt sich dieser Punkt auf den Aufnahmen auf einer kreisähnlichen Bahn, dann ist dies ein Planet. Diese Methode ist jedoch nur bei relativ nahen Sternsystemen möglich, da sonst die Lichtreflektion des Planeten im Licht des Sterns verschwindet. [34]

3.3.1. Beispiel

Im Jahr 2001 wurde an der University of California in der Umgebung um den Klasse-A Stern Fomalhaut erstmals ein Planet fotografiert, weitere Aufnahmen erfolgten durch das Hubble-Weltraumteleskop. Forscher schätzen die Planetenmasse auf ein dreifaches der des Jupiters. Ein Jahr auf diesem entspricht etwa 2000 Erdenjahre, aufgrund seiner Distanz von 115 AE zu seinem Stern. Die Oberflächentemperatur könnte sich auf rund -200 °C belaufen. [35]

3.4. Microlensing

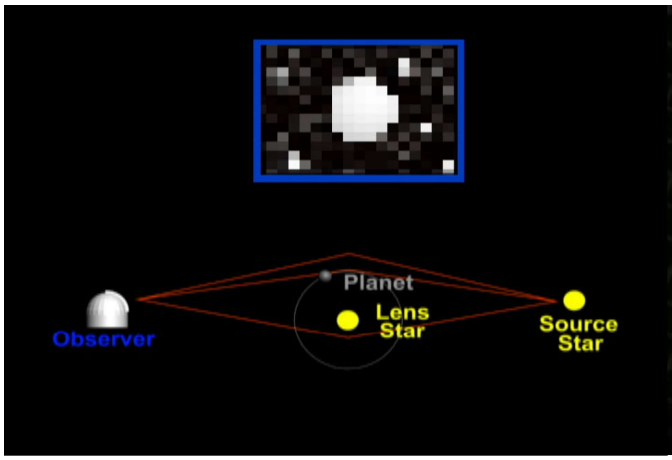


Bild [5]: Konstellation für die Himmelskörper um den Effekt der Gravitationslinsen zu ermöglichen, dazu die optische Wahrnehmung des Sterns

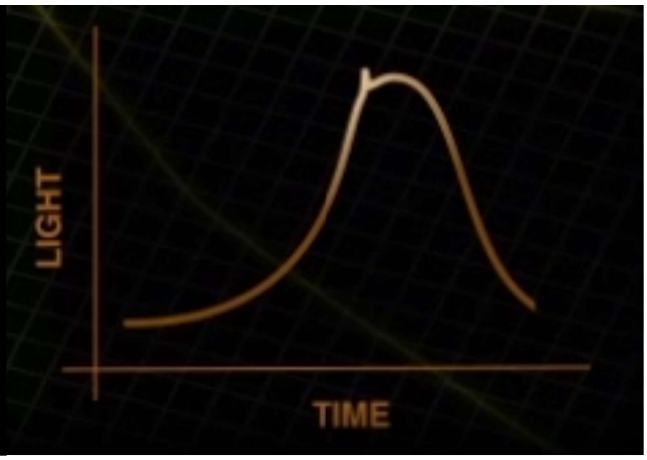


Bild [6]: Entwicklung der Lichtkurve unter Einfluss eines Planeten, mit der charakteristischen Aufspaltung der Kurve

Diese Methode basiert auf dem Phänomen der Gravitationslinsen (Bild[5]). Ähnlich wie bei der Transitmethode wird auch hier eine Veränderung in der Lichtkurve eines Sterns gemessen. Jedoch steigt hier die Lichtkurve an, wenn ein Sternsystem zwischen Beobachter und Stern durchfliegt (Bild[6]). Die Gravitationskraft der Massen im bewegenden Sternsystem fungiert als eine Art Linse. Wie in Bild[5] zu sehen, werden die Lichtstrahlen umgelenkt und treffen sich wieder. Im Gegensatz zu den Linsen, die wir in der Optik verwenden, sind diese nicht „scharf“ gestellt. Dies hat zur Folge, dass die Erscheinung des beobachteten Sterns sich verändern kann. Deshalb kann es sowohl zu einer optischen Deformation als auch zu einer vermeintlichen Mehrfachabbildung führen. Befindet sich nun ein Planet seitlich seines Sterns (Bild [5]), dann ist neben dem Anstieg der Helligkeit in der Kurve auch eine Aufspaltung des Graphen zu sehen (Bild [6]). Die dazu gekommene Kurve endet, ohne den Graphen wieder zu treffen. [36],[37]

Im Doppelsternsystem *OGLE-2013-BLG-0341L* wurde 2014 der Exoplanet *OGLE-2013-BLG-0341L B b* mit dieser Methode entdeckt. Er hat etwa 1,66 Erdmassen und kreist in deiner Entfernung von 0,7 AE um den zweiten Stern des Systems. [38],[39]

3.5. Astrometrie

Die Astrometrie ist eine der seltensten Methoden, wenn nicht die seltenste Methode, zur Entdeckung von Exoplaneten. Sie funktioniert wie die Radialgeschwindigkeitsmethode, mit dem Unterschied, dass die Radialbewegung des Sterns nicht frontal, sondern von oben beobachtet wird. Folglich sieht man die Bewegung des Sterns um den Bahnschwerpunkt. Aus der variierenden Distanz zu umliegenden Sternen lässt sich die ungefähre Größe, Distanz und Position von möglichen Begleitern des Sterns ableiten. [40]

Bis heute ist es Forschern lediglich einmal gelungen, mit dieser Methode einen Exoplaneten-Kandidaten zu finden, dieser konnte aber nicht bestätigt werden. Damit ein Planeten eindeutig nachgewiesen werde kann, muss sich in der Messung ab einem gewissem Zeitpunkt das Muster wiederholen. Wie bei der Radialgeschwindigkeitsmethode wird dies bei zunehmender Begleiterzahl schwieriger, weil die Planetenkonstellation immer anders ausfällt, demnach ist die Radialbewegung des Sterns auch anders.

4. Nachweis eines Exoplaneten am Schülerlabor Astronomie mit der Transitmethode

Im Rahmen dieser Facharbeit bot sich nun die Gelegenheit, einen Exoplanetentransit selbst zu dokumentieren. Am 13.02.2019 konnte ich unter Anleitung von Herrn Bernd Koch den Transit des extrasolaren Planeten WASP-104b aufzeichnen.

4.1. Vorbereitung für eine Transitaufnahme

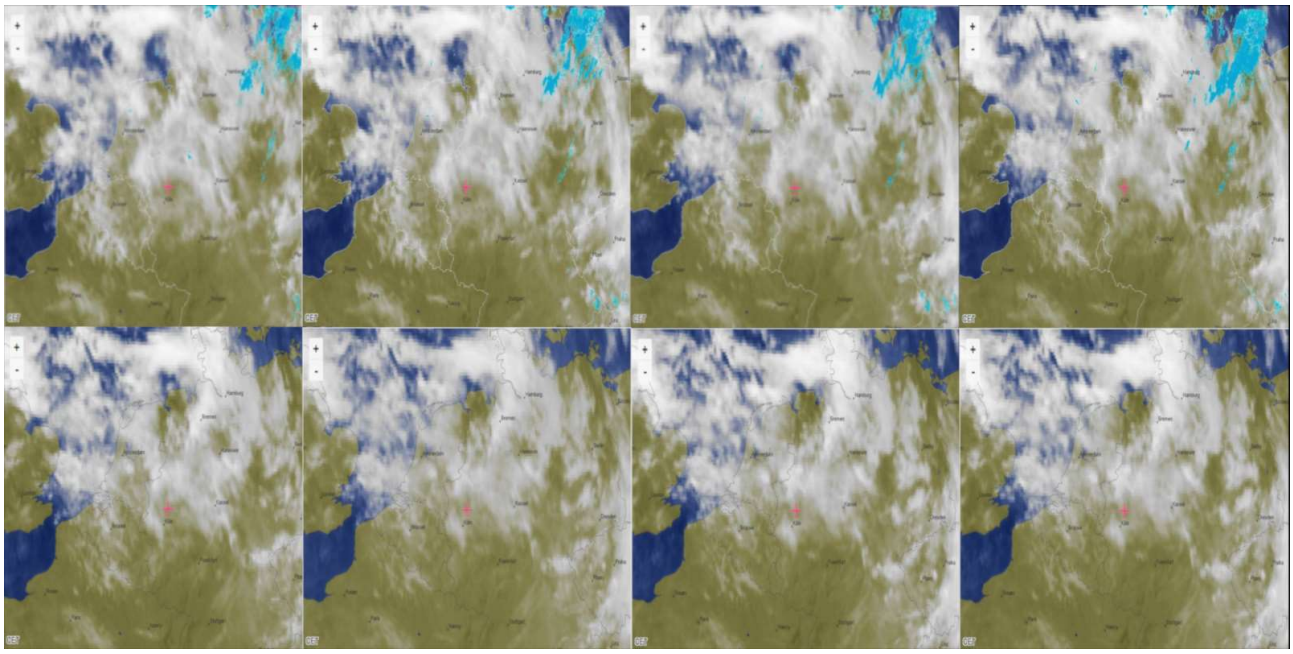


Bild [7]: Wolkenentwicklung während der Transitaufnahme am 13.02.19 zwischen 21:15h und 23:00h

Um mit der Vorbereitung der Transitaufnahme beginnen zu können, müssen im Voraus bestimmte Kriterien erfüllt sein.

Um genaue Messergebnisse zu erzielen, sollte die Wolkenschicht möglichst dünn sein (Bild [7]), optimal ist ein wolkenloser Nachthimmel.

Außerdem muss für einen Nachweis auch ein Exoplanetentransit im Sichtfeld stattfinden. Dabei spielt auch die Position und Umgebung eine wichtige Rolle. So fallen folglich Transits raus, die nur von der anderen Erdhalbkugel zu sehen sind. Auch sollte man auf die Umgebung des Teleskops achten; Hindernisse wie Bäume, Häuser oder ähnliches können den Stern verdecken.

	Cnc	36°,E	47°,SE	57°,SE				DE: +22 14 09.3
K2-34 b	Cnc	18:22 36°,E	**13.02. 19:36** **47°,SE**	20:51 57°,SE	149.5	11.548	0.0088	57141.35132+2.995607*E RA: 08 30 18.91 DE: 22 14 09.3
WASP-143 b	Hya	19:03 19°,E	**13.02. 20:36** **32°,SE**	22:09 40°,S	185.15	12.6	0.0169	57099.94471+3.778873*E RA: 09 23 22.96 DE: 02 55 57.102 55 57.1
WASP-104 b	Leo	20:52 27°,SE	**13.02. 21:45** **34°,SE**	22:38 41°,SE	105.72	11.12	0.0158	56406.11126+1.7554137*E RA: 10 42 24.61 DE: +07 26 06.3
WD 1145+017 b	Vir	21:36 19°,E	**13.02. 22:06** **23°,SE**	22:36 27°,SE	60	17.28	0.1035	57316.686+0.187517*E RA: 11 48 33.63 DE: +01 28 59.4

Bild [8]: Ausschnitt aus den stattfindenden Transits am Tag der Aufnahme; zu entnehmende Informationen (von links nach rechts): Bezeichnung, Sternbild, Transitbeginn, Transithöhepunkt, Transitende (alle der Angaben in GMT), Dauer in Minuten, scheinbare Helligkeit des Sterns, Helligkeitsabfall in Prozent und Position des Sterns

Mögliche Kandidaten für einen Transit findet man auf der *Exoplanet Transit Database*, eine tschechische Internetseite, die sämtliche Exoplaneten und deren Transits dokumentiert (Bild[8]). Dazu liefert sie auch Informationen wie Sternhelligkeit, Helligkeitsabfall während des Transits und die dazu gehörigen Daten zu Beginn und Ende des Transits. Außerdem benennt sie auch die Koordinaten des Sterns.

Wichtig bei der Auswahl des Transits ist auch die Helligkeit des Sterns und der prozentuale Helligkeitsabfall während des Transits. Lichtschwache oder weiter entfernte Sterne lassen sich mit kleinen Teleskopen nicht aufnehmen. Also ist bei der Auswahl des Sterns auf das eigene Equipment zu achten, da manche Sterne mit diesem vielleicht nicht aufnehmbar sind.

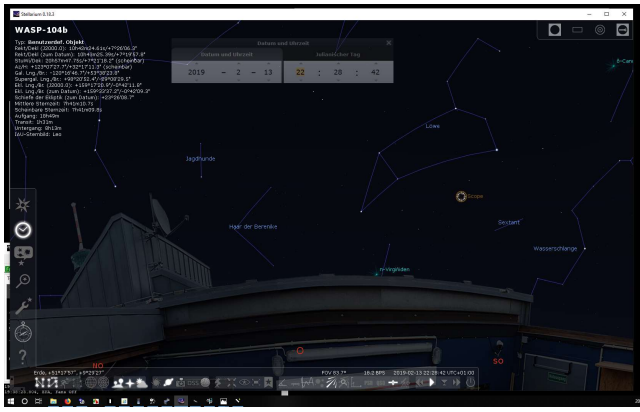


Bild [9]: Position des Sterns von der Sternwarte aus

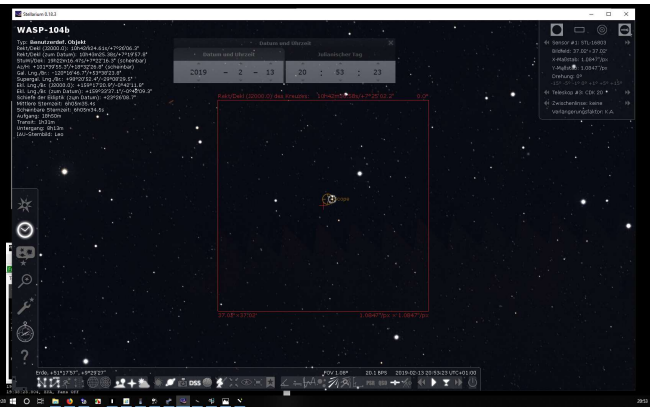
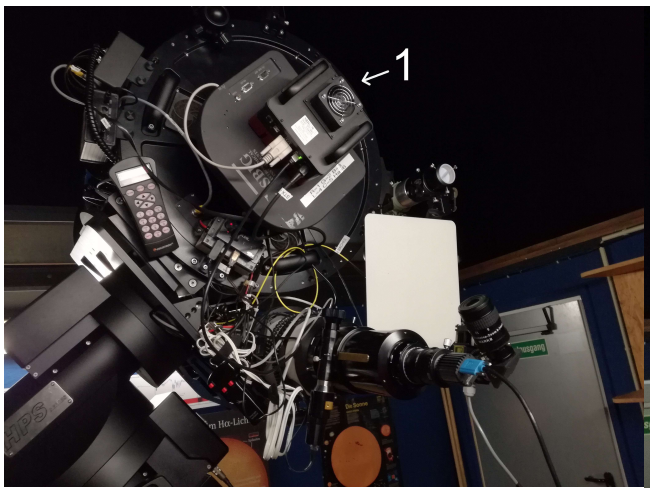


Bild [10]: Aufnahmefläche (rotes Quadrat)

Sind diese Kriterien erfüllt, beginnt der eigentliche Versuch. Der erste Schritt ist die Lokalisierung des Sterns am Nachthimmel. Hierzu wird über eine Software, in diesem Fall Stellarium, der Stern im Sternenatlas gesucht (Bild [9]). Die Software erstellt eine Simulation des Nachthimmels, in einer Suchleiste gibt man die Bezeichnung des ausgewählten Objektes ein.



Bild[11]: Rückansicht des Teleskops Planewave CDK20 und der CCD-Kamera SBIG STX-16803 (1)

Bild[12]: Seitenansicht des Teleskops mit einem weiteren Teleskop (weiß)

Die Software sucht nun im Sternenatlas nach diesem Stern und markiert ihn mit einer Art Fadenkreuz auf dem Bildschirm. Per Knopfdruck lässt sich nun das Teleskop (Bild[11]&[12]) mit der Software synchronisieren. Im Laufe der Aufnahmen (Bild [10]) wird der Stern sich geringfügig von der ursprünglichen Position entfernen. Um dies zu verhindern, wird mit einem weiteren Teleskop (Bild[12]), welches am Hauptteleskop parallel montiert ist, ein Leitstern anvisiert. Eine weitere Software korrigiert nun immer die Ausrichtung des Teleskops, indem diese versucht, den zweiten Stern immer im Mittelpunkt zu halten. Bevor man mit den Aufnahmen beginnt, muss man nun noch die Belichtungszeit und den Farbfilter festlegen. Die Belichtungszeit regelt die Helligkeit, die mit den Aufnahmen dokumentiert wird, die Dauer dieser richtet sich nach der Helligkeit des Zielsterns. Je dunkler dieser ist, umso länger wird er belichtet. Die Farbfilter dienen dazu, bestimmten Helligkeitseinflüssen entgegenzuwirken, zum Beispiel dem Mondlicht.

4.2. Messung eines Transits

Die Aufnahmen zur Transitmessung beginnen etwa 30 Minuten vor dem eigentlichen Transitanfang. Diese Vorlaufzeit soll die normale Helligkeit des Sterns erfassbar machen. Die Aufnahmen werden in regelmäßigen Abständen durchgeführt, die Dauer der Abstände richtet sich nach der zuvor bestimmten Belichtungszeit. Die Aufnahmen werden ebenfalls 30 Minuten über das Transitende hinaus gemacht, um das anfangs aufgenommene, normale Helligkeitsniveau wieder zu erreichen. Wenn dies abgeschlossen ist, werden nun sogenannte „Darkframes“ und „Flatframes“ aufgenommen. Die „Darkframes“ erfolgen bei kompletter Dunkelheit; auf diesen Bildern werden sämtliche tote Pixel, kaputte Zeilen/Spalten und das Rauschen aufgenommen. Wichtig ist es hier, die gleiche

Belichtungszeit zu wählen, wie zuvor bei den Transitaufnahmen. Die „Flatframes“ sind gleichmäßig belichtete Bilder, auf denen optisch bedingte Helligkeitsveränderungen erfasst sind. Die Belichtungszeit ist diesmal nicht abhängig von der zuvor verwendeten Belichtungszeit.

4.3. Der Zielstern WASP-104

Im Jahr 2014 wurden von der SuperWASP Exoplaneten-Suchmaschine im Sternbild des Löwen in einer Entfernung von 466 Lichtjahren der Stern WASP-104 und sein Begleiter WASP-104b entdeckt. Der Radius des Sterns beträgt 647.000 km und ist um 7% kleiner als der der Sonne, hat jedoch mit $2{,}028*10^{30}$ kg eine Masse, die die der Sonne um 2% übersteigt. Darüber hinaus leuchtet er mit einer scheinbaren Helligkeit von 11.12 Magnituden. Diese Faktoren ordnen ihn in die Spektralklasse G8 ein, unsere Sonne hingegen ist als G2-Stern klassifiziert. Um ihn am Himmel zu beobachten zu können, benötigt man ein 4-Zoll Teleskop oder größer. [41],[42],[43]

4.4. Auswertung des Transits von WASP-104b

Der erste Schritt zur Auswertung ist das Erstellen einer MasterDark- und MasterFlat-Aufnahme. Hierbei werden die *Flat* und *Dark Frames* jeweils mit dem Medianfilter gemittelt. Diese sogenannten MasterFrames werden dann mit den eigentlichen Aufnahmen durch die Software *Maxim Dl* verrechnet. Die umgewandelten Bilder werden nun mit „Muniwin“ ausgewertet. Die Software sucht eigenständig sämtliche Sterne aus den Bildern raus.

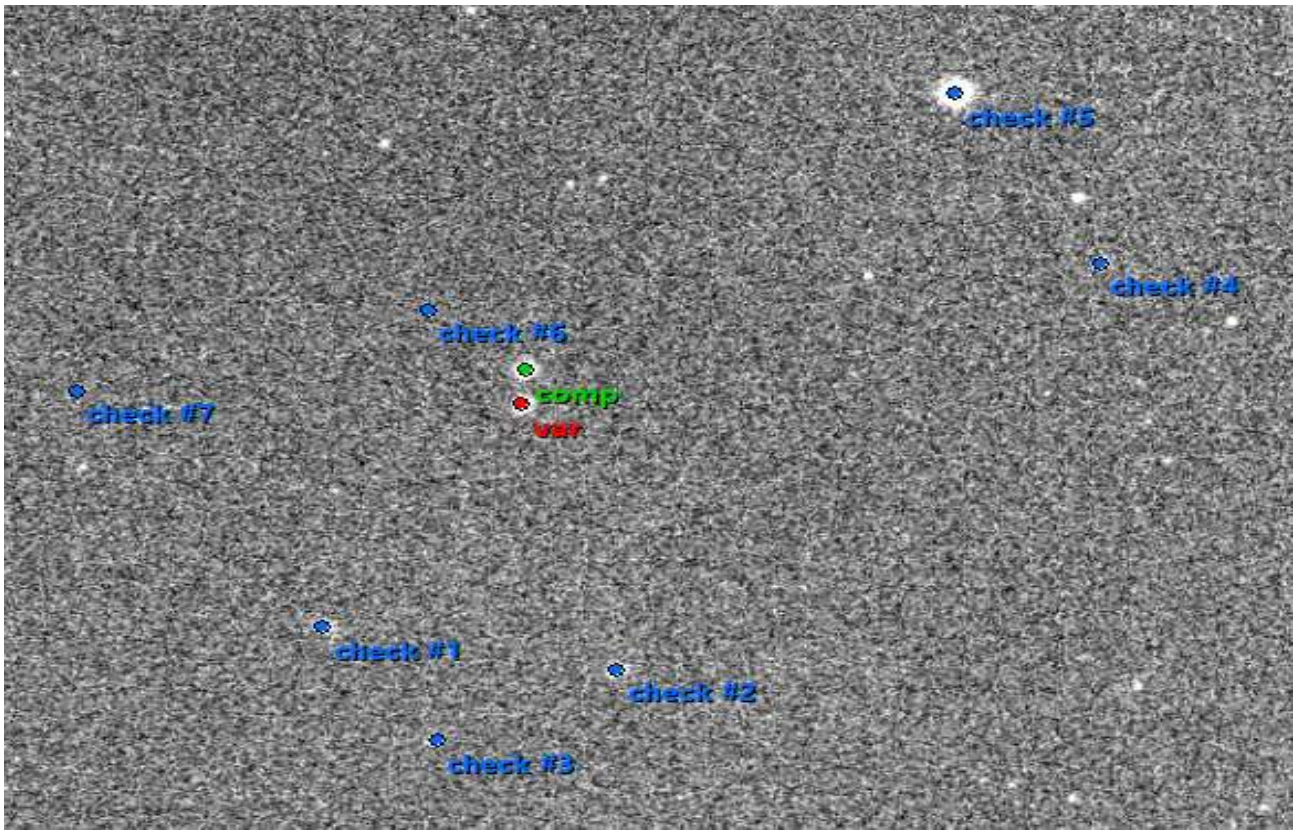


Bild [13]: Position der ausgewählten Sterne zur Helligkeitsanalyse von WASP-104 (var)

Im Folgenden kann man manuell die Sterne in drei Kategorien einteilen (Bild[13]):

- ein variabler Stern; der Stern, um den der Transit stattgefunden hat (rot)
- ein Vergleichsstern; seine Helligkeit wird mit dem variablen Stern abgeglichen (grün)
- sogenannte Check-Sterne; sie sind weitere Vergleichssterne, um die Helligkeit des variablen Sterns zu messen (blau)

Nach der Auswahl werden die ausgewählten Sterne von der Software in den anderen Dateien gesucht. Daraufhin werden in Diagrammen die Verhältnisse der Sternhelligkeiten von jeweils zwei der ausgewählten Sterne ausgegeben. Die Diagrammanzahl erfasst alle möglichen Kombinationen zwischen den ausgewählten Sternen. Die Achsen des Diagramms sind mit der Zeit (X-Achse) und der Helligkeit (Y-Achse) skaliert. Die einzelnen Messergebnisse sind als Punkte im Koordinatensystem angegeben, jeder Punkt ist mit einem Toleranzbalken versehen, der die Ungenauigkeiten darstellt, die bei der Messung entstehen. Im ersten Schritt schaut man sich nun die Helligkeitsverläufe des Vergleichssterns gegenüber der Check-Sterne an, um die Konstanz der Helligkeit des Sternes zu ermitteln. Ist die Helligkeit im Vergleich zu einem Großteil der Check-Sterne nicht konstant, so fällt der Stern als Vergleichsstern raus. Sind jedoch Helligkeitskurven untereinander identisch, dann ist dieser Stern als Vergleichsstern geeignet. Daraufhin wird dann die Helligkeit des Zielsterns mit dem Vergleichsstern verglichen.

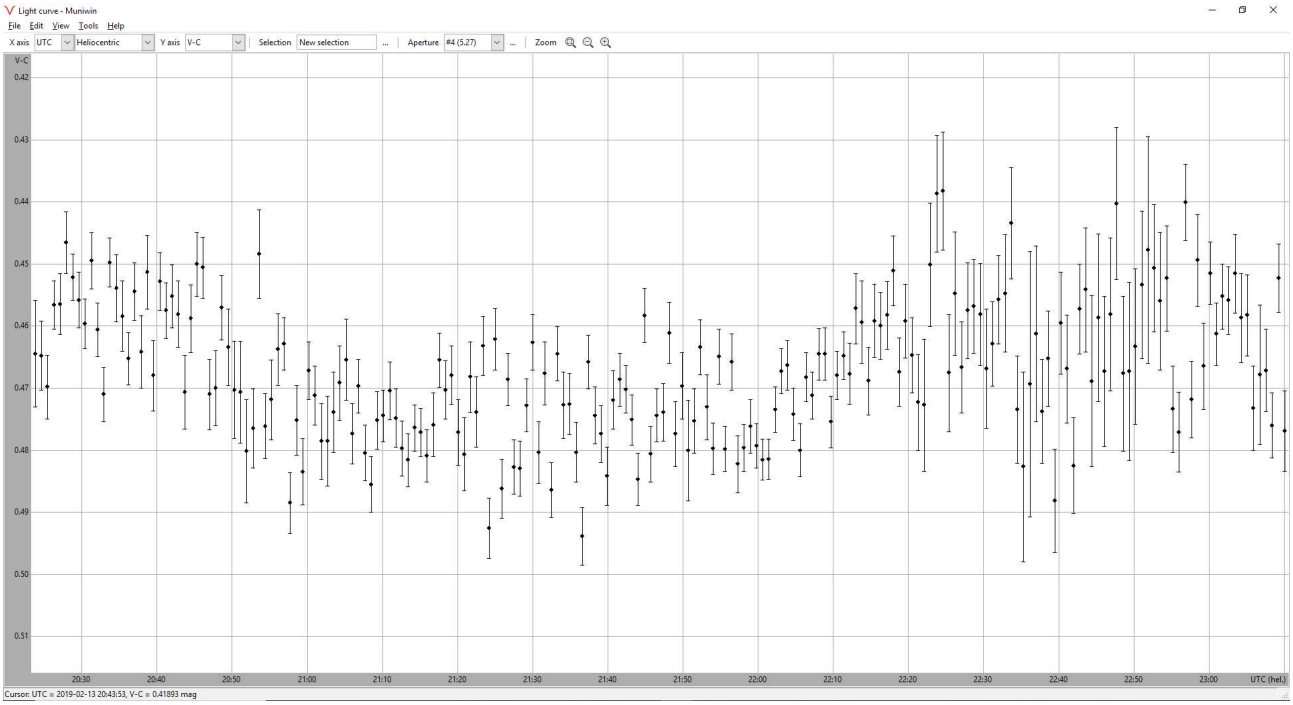
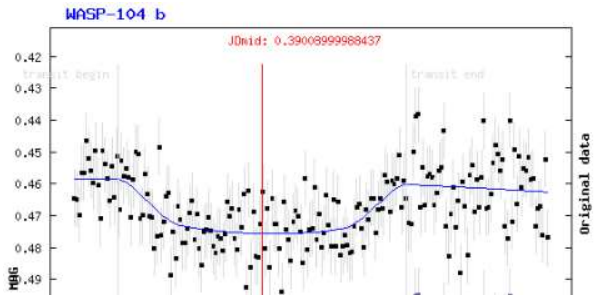
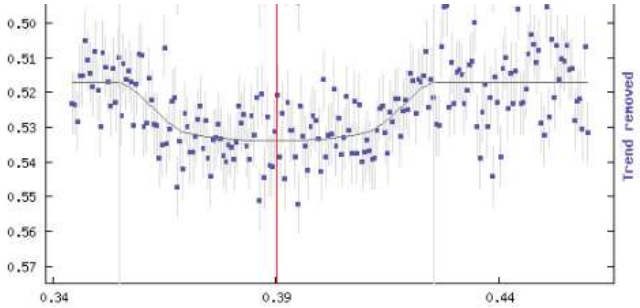


Bild [14]: Helligkeitskurve des Sterns WASP-104b gegenüber dem Vergleichsstern (Bild [13])



Bild[15]: Ausgleichskurve zu den original Aufnahmen



Bild[16]: Korrigierte Ausgleichskurve zum Transitende

Die erstellte Helligkeitskurve (Bild[14]) wird nun von *Muniwin* in eine Text-Datei konvertiert. Diese Datei wird mit weiteren Informationen auf der *Exoplanet Transit Database* (ETD) hochgeladen. Dort wird zuerst die Helligkeitskurve des Sterns mit einer Ausgleichskurve versehen (Bild[15]), dann wird die Ausgleichsgerade insofern korrigiert, dass Anfang und Ende sich auf einem gleichen Wert befinden (Bild[16]). Dann werden die Parameter des Planeten aus den gemessenen Daten ermittelt und in Vergleich zu vorherigen Aufnahmen gestellt. Zu Beginn der Auswertung durch die Internetseite lässt sich festlegen welche der Parameter „fix“ - also festgelegt – oder „fit“ - also zum anpassen – sind. Für die Auswertung dieses Transits wurden alle ermittelbaren Parameter als „fit“ angegeben.

4.5. Bestimmung der Parameter von WASP-104b

Name and Surename: David Oelmann

Post address: Jung-Stilling-Weg 45

E-mail: info@schuelerlabor-astronomie.de

Observatory / Station: arl-Fuhlrott-Gymnasium, Wuppertal/Germany

Observing location: ELongitude: 13889 ° | Latitude: +51,2 ° (North +, South -)

Equipment: Planewave CDK20 + STX-16803

Used filter: U B V R I Clear

Notes: Cloudy Night, Moonlight

Observation already published:

Bild[17]: Beobacher Angaben zur Auswertung auf der *ETD*

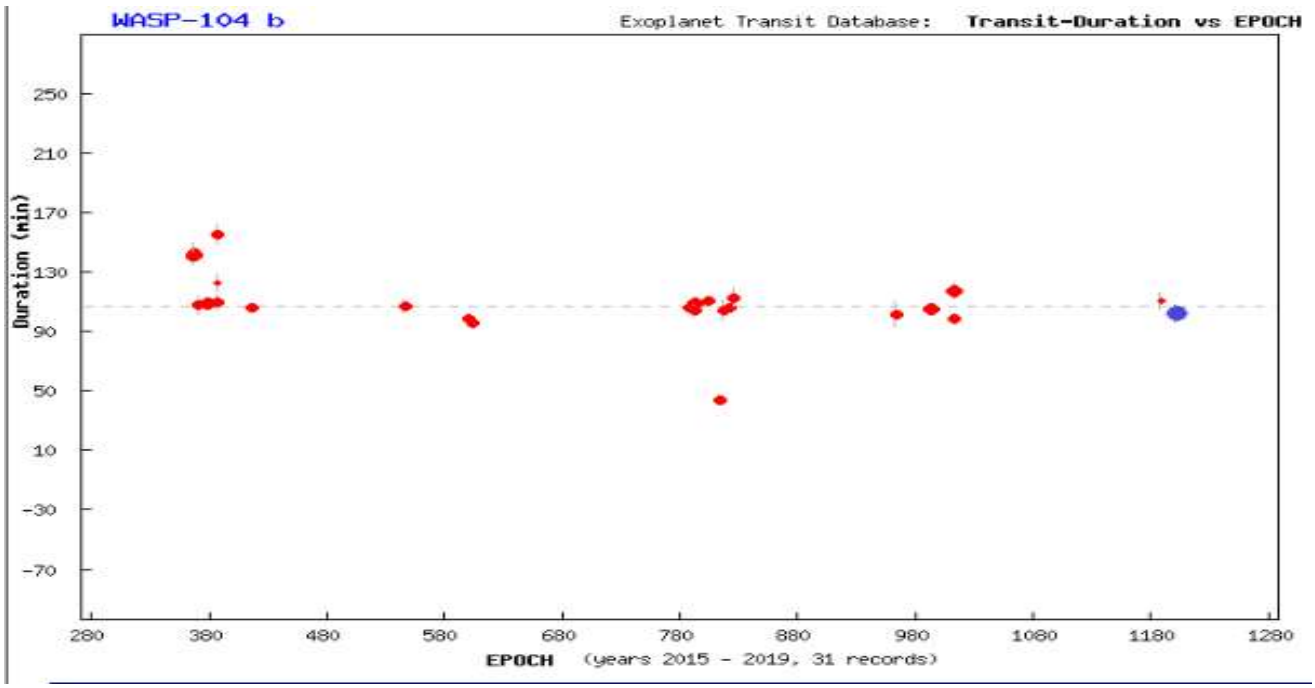
Der erste Schritt für die Auswertung der Parameter ist das Ausfüllen eines Formulars (Bild[17]) zu bestimmten Angaben über den Beobachter. Auf den folgenden Bildern wird ein Vergleich von den errechneten Parametern zwischen den einzelnen Transitaufnahmen von WASP-104b geschaffen. Der Vergleich erfolgt durch ein Koordinatensystem; in diesem sind die Parameter zum Entdeckungszeitpunkt (gestrichelte Linie), von anderen Beobachtern (rote Punkte) und meine Ergebnisse (blauer Punkt) vermerkt. Außerdem werde ich zunächst den Planetenradius (R_P) bestimmen, die sich aus den Messungen ergeben hat.

Hierfür wird die Transittiefe (ΔT) und der Radius des Sterns (R_s) benötigt. Die Werte werden in die entsprechende Formel eingesetzt, die Transittiefe belief sich auf 0,0168 Magnituden und der Sternenradius beträgt 647.000 km:

$$R_P = R_S * \sqrt{\Delta F} \quad \rightarrow$$

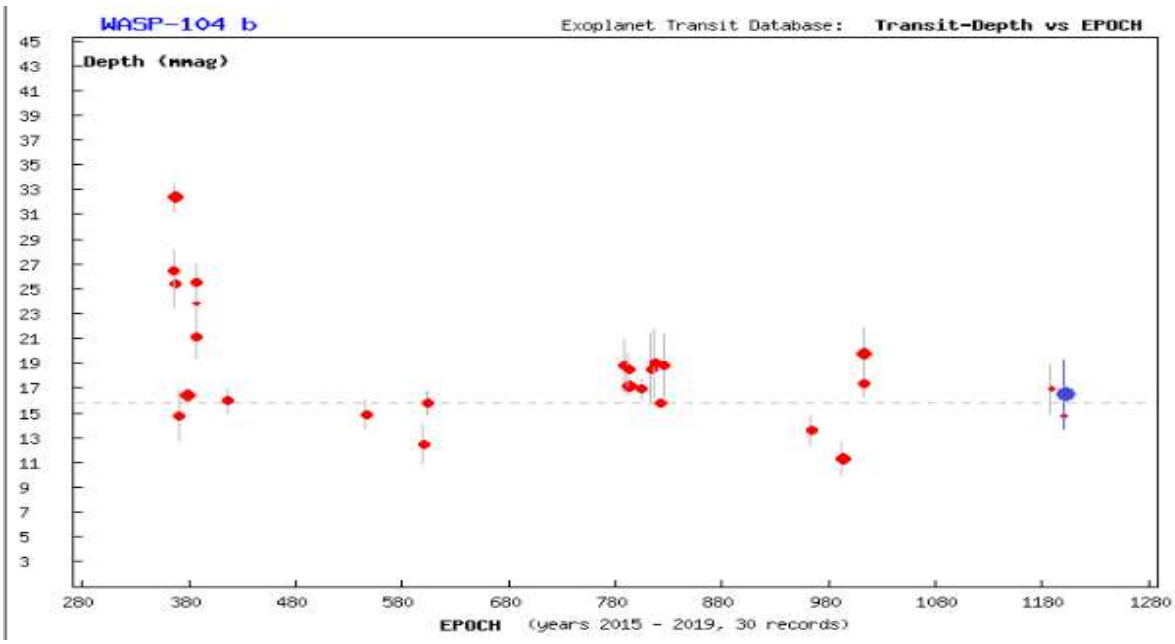
$$R_P = 647.000\,km * \sqrt{0{,}0168} = 83.360\,km = 1{,}166\,R_J,\ wobei\ R_J = 7{,}1492 * 10^7\,m$$

Somit ist WASP-104b aufgrund seiner Größe als jovianischer Planet einzuordnen. Er zählt höchstwahrscheinlich zu Gasriesen.



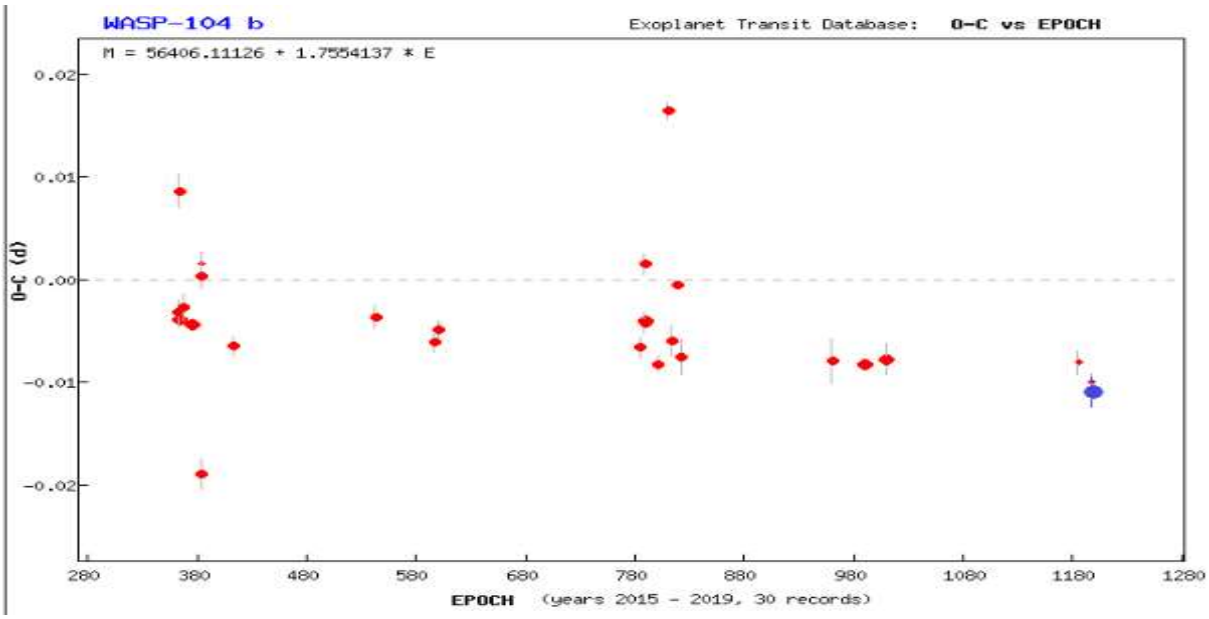
Bild[18]: Diagramm zum Vergleich der gemessenen Transitdauer

Die erste Grafik zeigt die Transitdauer von WASP-104b. Zu seiner Entdeckung hatte er eine Transitdauer von rund 105 Minuten. Diese scheint konstant geblieben zu sein. Meine Aufnahme des Transits wich lediglich um 4 Minuten von der Anfangsumlaufdauer ab.



Bild[19]: Diagramm zum Vergleich der Tiefen der aufgezeichneten Transits

Die zweite Grafik zeigt die Transittiefe in Millimag, also ein Tausendstel von der Einheit, die die scheinbare Helligkeit des Sterns angibt. Hier sieht man klar, dass ein Großteil über der Ursprungstransittiefe von 15,8 Millimag liegt. Dies liegt an der Wahl des jeweiligen Farbfilters, in dem der Transit aufgenommen wurde.

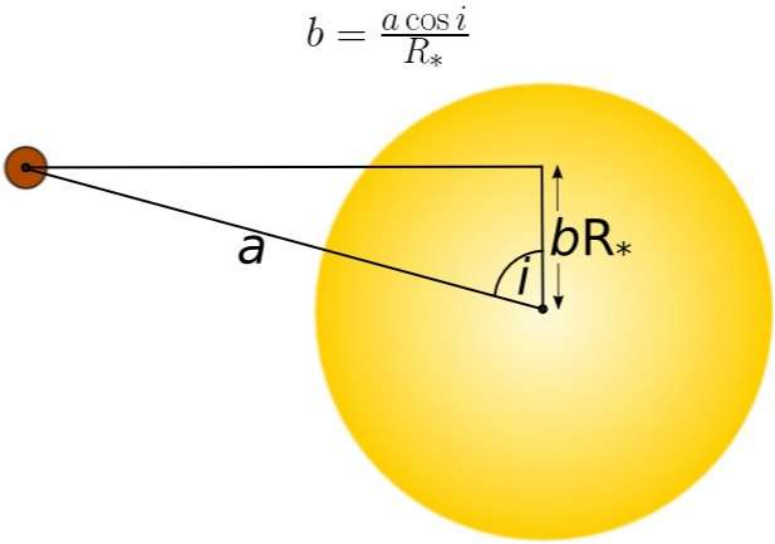


Bild[20]: Diagramm zum Vergleich der Umlaufzeiten von WASP-104b

Die letzte Grafik zeigt die Umlaufzeit des Planeten um WASP-104. Hier ist klarer Trend zu sehen. Die Umlaufzeit von 1,75 Tagen nimmt langsam aber konstant ab. Über die Ursachen davon lässt sich nur spekulieren, da Störungen wie Wolken, keinen Einfluss darauf haben. Eine mögliche Ursache könnte eine Abnahme der Distanz zum Zentralstern bedeuten.

Die große Bahnhalbachse des Planeten lässt sich aus den bereits gewonnenen Parametern bestimmen:

$$a=\sqrt[3]{\frac{G*M_S*T_P{}^2}{4*\pi^2}} \Rightarrow a=\sqrt[3]{\frac{6{,}67259*10^{-11}*2{,}028*10^{30}*151200^2}{4*\pi^2}}\,m=4{,}279*10^9\,m=0{,}028\,AE$$ [24]



Bild[21]: Berechnung des sog. Impactfaktors (b) mit dem Sternradius (R_*) und der Bahnneigung (i)

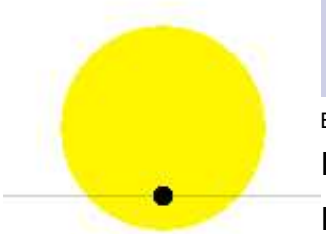
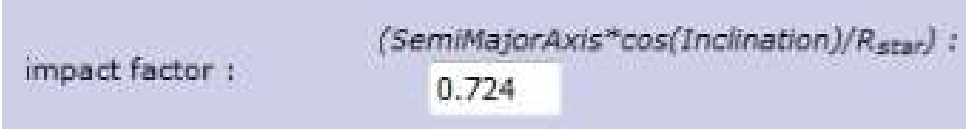


Bild [23]: Transithöhenrekon-struktion



Bild[22]: Errechneter Impactfactor von der *ETD*

Im Zuge der Auswertung durch die *ETD* wurde auch der Impactfaktor errechnet (Bild[21]), dieser setzt sich zusammen aus der Bahnneigung des Planeten, der hier bei 86,5° liegt, der großen Bahnhalbachse und dem Sternenradius (Bild[22]).Daraus lässt sich ein Bild von der wahrscheinlichen Transithöhe vor dem Stern erstellen(Bild[23]).

Professoren an der Keele Universität, im Vereinigten Königreich, fanden mittels der Spektralanalyse heraus, dass die Planetenatmosphäre große Mengen an Kalium und Natrium beinhaltet. Diese Atmosphärenzusammensetzung ist nicht nur außergewöhnlich, sie macht den Exoplaneten zu einem der dunkelsten, die je entdeckt wurden. Dies führt zu einer berechneten Oberflächentemperatur von 1.516 K, was etwa 1.243 °C entspricht.[44],[45]

Abschließend stelle ich die ermittelten Daten den offiziellen Angaben gegenüber:

	Messergebnis	Datenbank[45],[46]
Planetenradius	1,166 R_J	1,137 R_J
Planetenmasse	-	1,272 M_J
Transitdauer	101,4 min	105,72 min
Transittiefe	0,0168 mag	0,0158 mag
Umlaufzeit	1,745 d	1,755 d
Große Halbachse	0,028 AE	0,029 AE
Bahnneigung	86,5°	83,63°
Temperatur	-	1.243 °C

5. Abschließende Betrachtung

Das Universum beherbergt unzählige Sterne diverser Klassen, ein Bruchteil dieser können wir am Sternenhimmel beobachten. Im Laufe unserer Evolution haben wir die Möglichkeit entwickelt, tief in den Weltraum zu sehen. Des Weiteren sind wir in der Lage das, was wir durch Fernrohre und Teleskopen sehen, zu analysieren und zu deuten. Mit Hilfe dieser Methoden ist es uns gelungen beinahe 4.000 Planeten außerhalb unseres Sonnensystem zu entdecken. Wir wissen nicht nur über ihre Existenz, auch ihre Parameter bleiben nicht verborgen. Mit verschiedensten Methoden lassen sich nahezu alle Daten von Radius über Masse bis hin zu Oberflächentemperatur und Umlaufzeit ermitteln. Das Sonnensystem ist also nicht das einzige Planetensystem in unserem Universum. Ein Teil dieser hat sogar Planeten, die der Erde sehr ähnlich sind und theoretisch in der Lage wären intelligentes Leben zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

[1] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/planetenentstehung/11322 // 16.01.2019

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Astronomie#Siehe_auch // 10.02.2019

[3] https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Astronomie#Vorgeschichtliche_Himmelsbeobachtungen // 18.01.2019

[4] https://www.geo.de/wissen/weltall/15396-rtkl-definitionssache-was-ist-ein-planet // 16.01.2019

[5] https://lexikon.astronomie.info/planeten/definition.html // 16.01.2019

[6] https://de.wikipedia.org/wiki/Planet // 16.01.2019

[7] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/news/2012/planetenentstehung-das-ploetzliche-verschwinden-von-staub-um-einen-jungen-stern/ // 16.01.2019

[8] https://abenteuer-universum.de/planeten/planeten.html // 16.01.2019

[9] http://www.takimo.de/lexikon/planeten.html // 16.01.2019

[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Klassifizierung_der_Planeten // 19.01.2019

[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Habitable_Zone // 19.03.2019

[12] https://de.wikipedia.org/wiki/Merkur_(Planet) // 19.03.2019

[13] https://de.wikipedia.org/wiki/Venus_(Planet) // 19.03.2019

[14] https://de.wikipedia.org/wiki/Erde // 19.03.2019

[15] https://de.wikipedia.org/wiki/Mars_(Planet) // 19.03.2019

[16] https://de.wikipedia.org/wiki/Jupiter_(Planet) // 19.03.2019

[17] https://de.wikipedia.org/wiki/Saturn_(Planet) // 19.03.2019

[18] https://de.wikipedia.org/wiki/Uranus_(Planet) // 19.03.2019

[19] https://de.wikipedia.org/wiki/Neptun_(Planet) // 19.03.2019

[20] https://de.wikipedia.org/wiki/Erd%C3%A4hnlicher_Himmelsk%C3%B6rper // 19.03.2019

[21] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/ // 24.01.2019

[22] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/2 // 24.01.2019

[23] https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode // 24.01.2019

[24] https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf // 25.03.2019

[25] https://de.wikipedia.org/wiki/Astronomische_Einheit // 28.03.2019

[26] https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichgewichtstemperatur // 09.03.2019

[27] https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler-22b // 27.01.2019

[28] https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler_(Weltraumteleskop)#/ 27.01.2019
[29] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/1 // 27.01.2019
[30] https://www.astro.uni-jena.de/EXO/radvel/wiefunktionierts.htm // 10.02.2019
[31] https://de.wikipedia.org/wiki/Dimidium // 24.02.2019
[32] https://de.wikipedia.org/wiki/High_Accuracy_Radial_velocity_Planet_Searcher // 01.03.2019
[33] https://de.wikipedia.org/wiki/HD_10180 // 01.03.2019
[34] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/3 // 10.02.2019
[35] https://de.wikipedia.org/wiki/Fomalhaut_b // 01.03.2019
[36] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/4 // 23.02.2019
[37] https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_microlensing // 23.02.2019
[38] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/DisplayOverview/nph-DisplayOverview?objname=OGLE-2013-BLG-0341L+B+b&type=CONFIRMED_PLANET // 10.03.2019
[39] http://www.openexoplanetcatalogue.com/planet/OGLE-2013-BLG-0341L%20B%20b/ // 10.03.2019
[40] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/5 // 23.02.2019
[41] https://www.universeguide.com/star/wasp104 // 23.02.2019
[42] http://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/WASP-104.html // 25.03.2019
[43] https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html // 25.03.2019
[44] https://en.wikipedia.org/wiki/WASP-104b // 23.02.2019
[45] http://exoplanet.eu/catalog/wasp-104_b/ // 25.03.2019
[46] http://var2.astro.cz/ETD/etd.php?STARNAME=WASP-104&PLANET=b // 25.03.2019

Bildquellenverzeichnis

Titelbild selbst erstellter Zusammenschnitt von Bild[15] und Bild[16]

Bild[1] https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/kepler-22b-diagram.html // 09.02.2019

Bild[2] selbst erstellt

Bild[3] https://www.astro.uni-jena.de/EXO/radvel/wiefunktionierts.htm // 10.02.2019

Bild[4] selbst erstellt

Bild[5] https://www.nasa.gov/vision/universe/newworlds/microlensing.html // 23.02.2019

Bild[6] https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/#/4 // 23.02.2019

Bild[7] https://www.meteoblue.com/de/wetter/vorhersage/woche/wuppertal_deutschland_2805753 // 19.02.2019

Bild[8] http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php?init=2019-02-13&till=2019-02-14&submit=Show&f=userdefined // 19.02.2019

Bild[9] Screenshot aus *Stellarium*

Bild[10] Screenshot aus *Stellarium*

Bild[11] eigenes Foto

Bild[12] eigenes Foto

Bild[13] Screenshot aus *Muniwin*

Bild[14] Screenshot aus *Muniwin*

Bild[15] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[16] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[17] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[18] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[19] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[20] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[21] Fig. 1 aus „The exoplanet transit method“ von Paul Anthony Wilson auf https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/

Bild[22] Screenshot von der Auswertung auf http://var2.astro.cz/ETD/ *

Bild[23] selbst erstellt

* nur der Link zu der Internetseite, Link zur Auswertung ist erloschen

Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.
Verwendete Informationen aus dem Internet sind mit Link im Quellen- und Bildverzeichnis angegeben.

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

Wuppertal, den 28.03.2019