

## Auf der Suche nach fernen Welten

In Bezug zum Beitrag „Exoplanetenjäger TESS komplettiert Himmelspanorama“ aus der Rubrik: „Blick in die Forschung: Nachrichten“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 7/2021, WIS-ID: 1421052, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe

Andreas Jørgensen

Im Inneren unseres Sonnensystems ziehen die Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars ihre Bahnen, während Gasriesen in den äußeren Regionen zu finden sind. Sehen andere Planetensysteme vergleichbar aus? Nur ein Planet in unserem Sonnensystem hat die richtigen Bedingungen, um Leben zu begünstigen: die Erde. Gibt es erdähnliche Planeten, die andere Sterne umkreisen und auf denen es Leben geben könnte?

Um diese und ähnliche Fragen zu beantworten, durchforsten Wissenschaftler\*innen den Himmel nach Exoplaneten. Vor allem Weltraumteleskope wie der Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) haben in den letzten Jahren wesentlich zu der daraus resultierenden beachtlichen Datenmenge beigetragen. Das vorliegende Material bietet eine Einführung in die Vorgehensweise, die dabei zum Einsatz kommt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Sterne	Exoplaneten, <a href="#">Transitmethode</a> , <a href="#">Sternenbeben</a>
Physik	Schwingungen und Wellen	<a href="#">Sterne als schwingungsfähige Systeme</a>
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Mathematik Astronomie – Informatik	<a href="#">Interpretation von Grafiken</a> (logarithmisch), <a href="#">Geometrie</a> (Kugel erscheint in Projektion als Kreisfläche, die angegebenen Formeln zur Transitmethode lassen sich einfach herleiten), der Text enthält Referenzen, die zur <a href="#">Arbeit mit astronomischen Datenbanken</a> einladen
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis- gewinnung, Kommunika- tion), Lehr-/ Sozialformen Unterrichtsmittel	<a href="#">Daten-Recherche</a> , <a href="#">Diskussionsaufgaben zu den Themen der Datenerhebung und Verzerrung</a> , <a href="#">Ergebnisse beurteilen</a> , <a href="#">Aufgaben zum Thema Exoplaneten</a> , <a href="#">Einzelarbeit</a> , <a href="#">Partner- und Gruppenarbeit</a> , <a href="#">Plenum</a> ,

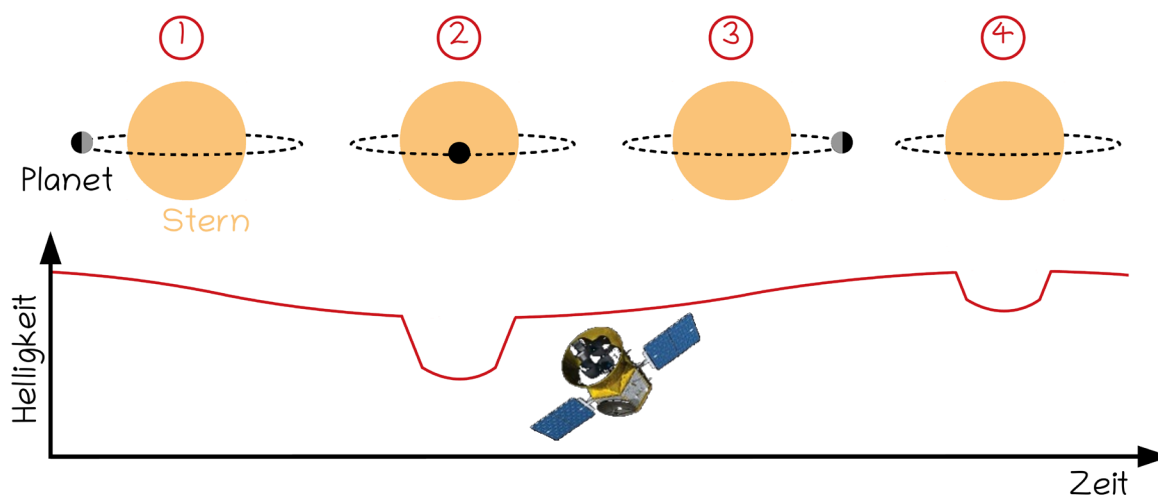


Abbildung 1: Stilisierte Veranschaulichung des Helligkeitsverlaufs eines Sterns während eines Umlaufs eines seiner Planeten, in dessen Bahnebene wir schauen. Beim Umlauf verdeckt der Planet zeitweise den Stern, was die beobachtete Helligkeit des Sterns verringert (2). Da der Planet das Licht des Sterns reflektiert, erfolgt ein zusätzlicher Helligkeitsabfall, wenn der Planet hinter dem Stern verschwindet (4). Dazwischen trägt das diffus reflektierte Licht vom Planeten zur gemessenen Helligkeit bei (1 und 3). ©: Andreas Jørgensen, CC0. Einschubbild: Satellit TESS. ©: By NASA - <http://tess.gsfc.nasa.gov/documents/TESS-Litho.pdf>, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34177861>, Public Domain.

## Wie macht man Exoplaneten ausfindig?

[Zurück zum Anfang](#)

Seit 2018 spürt das Weltraumteleskop [TESS](#) fremde Welten auf, die ferne Sterne umkreisen. Wie seine beiden Vorgänger [CoRoT](#) und [Kepler](#), deren Missionen 2006 bzw. 2009 gestartet wurden, nutzt TESS dafür die sogenannte Transitmethode. Das zugrundeliegende Prinzip ist in Abb. 1 auf der Titelseite dargestellt: Falls die Bahnebene des Planeten die Sichtlinie zwischen seinem Wirtsstern und einem Beobachter kreuzt, wird der Beobachter eine Veränderung der Helligkeit des Sterns feststellen, wenn der Planet am Stern vorbeizieht. Dies geschieht, da der Stern teilweise verdeckt wird. Das Vorbeiziehen des Planeten wird als Transit bezeichnet.

Je größer der Planet ist, desto stärker verdunkelt er den Stern – desto weniger Licht erreicht also den Beobachter während des Transits. Genauer gesagt hängt die relative Abnahme der Helligkeit ( $\Delta F$ ) des Sterns in erster Näherung nur vom Radius des Planeten ( $R_P$ ) und des Sterns ( $R_\star$ ) ab:

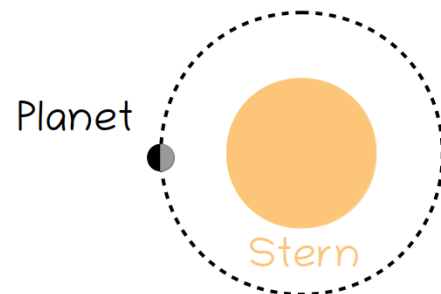
$$\Delta F = \frac{R_P^2}{R_\star^2}$$

Wenn wir also wissen, wie groß der Stern ist, dann können wir aus dem beobachteten Helligkeitsabfall den Radius des Planeten bestimmen. Mit ein wenig mehr Rechenaufwand kann man sogar noch viel mehr aus dem Helligkeitsverlauf herausholen. Wir werden hier aber nicht weiter ins Detail gehen.

Die Methode basiert auf der Annahme, dass die Bahnebene des Planeten die Sichtlinie zwischen dem Stern und dem Beobachter kreuzt. Dies muss natürlich nicht der Fall sein (siehe Abb. 2). In der Tat ist es in vielen Fällen ziemlich unwahrscheinlich. Unter der Annahme, dass der Planet viel kleiner ist als sein Wirtsstern und dass seine Bahn kreisförmig ist, ist die Wahrscheinlichkeit ( $p_{\text{tra}}$ ), dass die Orientierung der Bahnebene die Beobachtung eines Transits erlaubt, somit

$$p_{\text{tra}} = \frac{R_\star}{a} \approx 0,005 \cdot \frac{R_\star}{R_\odot} \cdot \frac{1 \text{ AE}}{a}$$

Dabei bezeichnet  $a$  den Radius der kreisförmigen Umlaufbahn (die große Halbachse) und  $R_\odot$  den Radius der Sonne. Wenn wir also einen Planeten entdecken wollen, der einen sonnenähnlichen Stern ( $R_\star=1 R_\odot$ ) in einer Entfernung von 1 AE umkreist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Ausrichtung der Planetenbahn dies zulässt, lediglich 0,005, also 0,5 Prozent. Um dieses Problem zu umgehen, beobachten Wissenschaftler\*innen einfach sehr viele Sterne. Bei einigen wird man Glück haben. Nun fällt auf, dass in beiden obigen Formeln der Radius des Sterns vorkommt. Da drängt sich eine Frage auf ...



**Abbildung 2:** Beispiel für eine Orientierung der Bahnebene am Nachthimmel, bei der kein Transit beobachtet werden kann.  
©: Andreas Jørgensen, CC0.

## Woher weiss man, wie groß die Sterne sind?

[Zurück zum Anfang](#)

Es steckt noch sehr viel mehr Information im Helligkeitsverlauf eines Sterns. So unterliegen Sterne Helligkeitsschwankungen, die von [Sternenbeben](#) verursacht werden. Ein Stern verhält sich in diesem Zusammenhang wie ein Musikinstrument: Ein Instrument spielt nur die Töne, die sein Aufbau begünstigt (Stichwort: stehende Wellen). So ist es auch bei Sternen: Sternoberflächen können beben, und die Frequenzen, mit denen diese Schwingungen stattfinden, werden von der Struktur des Sterns diktiert. Das bedeutet auch, dass verschiedene Sterne aufgrund ihrer unterschiedlichen Struktur unterschiedliche Schwingungen aufweisen. Durch den Vergleich der gemessenen Helligkeitsschwankungen mit detaillierten Computermodellen können Wissenschaftler\*innen somit die Eigenschaften eines Sterns bestimmen.

Auch die Sonne pulsiert. Ihre Schwingungen haben viele verschiedene Frequenzen. Die stärkste Schwingung der Sonnenoberfläche hat eine Frequenz von 3090  $\mu\text{Hz}$  (wobei 1  $\mu\text{Hz}$   $10^{-6}$  Hz entspricht). Darüber hinaus weist die Sonne beispielsweise weitere starke Schwingungen im Abstand von 135  $\mu\text{Hz}$  auf. Dieser Abstand wird als der große Frequenzabstand bezeichnet. Da sich die Schwingungen der Sonne nicht nur an der Oberfläche ausbreiten, sondern auch ins Innere des Sterns vordringen, sagen diese Werte viel über den Aufbau der Sonne aus. So können Forscher\*innen anhand von Vergleichen zwischen Computersimulationen und Schwingungsmessungen den inneren Aufbau der Sonne mit hoher Genauigkeit beschreiben.

Für unsere Zwecke reicht es jedoch zu wissen, dass sich in erster Näherung der Radius bestimmter Sterne aus wenigen Messungen berechnen lässt. Dazu genügt es, die Frequenz ( $\nu_{\text{max}}$ ) der Schwingung mit der größten Amplitude, den großen Frequenzabstand ( $\Delta\nu$ ) und die Effektivtemperatur (d. h. die Oberflächentemperatur,  $T_{\text{eff}}$ ) des Sterns zu kennen:

$$\frac{R_{\star}}{R_{\odot}} = \frac{\nu_{\text{max}}}{3090 \mu\text{Hz}} \cdot \left( \frac{135 \mu\text{Hz}}{\Delta\nu} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{eff}}}{5777 \text{ K}}}$$

Setzt man hier die Werte für die Sonne ein ( $\nu_{\text{max}} = 3090 \mu\text{Hz}$ ,  $\Delta\nu = 135 \mu\text{Hz}$ ,  $T_{\text{eff}} = 5777 \text{ K}$ ), ergibt sich ein Radius von 1  $R_{\odot}$ .

## Literatur und weitere Quellen

[Zurück zum Anfang](#)

- [1] de Meulenaer, P., Carrier, F., Miglio, A., et al., *Core properties of  $\alpha$  Centauri A using asteroseismology*, 2010, A&A, 523, A54.
- [2] Kallinger, T., Weiss, W. W., Barban, C., et al., *Oscillating red giants in the CoRoT exofield: asteroseismic mass and radius determination*, 2010, A&A, 509, A77.
- [3] Kervella P., Bigot L., Gallenne A., Thévenin F., *The radii and limb darkenings of  $\alpha$  Centauri A and B*, 2017, A&A, 597, A137.
- [4] Seager, S., *Exoplanets*, 2010, The University of Arizona Press, ISBN: 978-0-8165-2945-2

Informationen zu den Themen [TESS](#) und [Transitmethode](#) sind auf [Wikipedia.de](#) zu finden.

Bei den Schwingungen sonnenähnlicher Sterne handelt es sich um stochastisch angeregte Schallwellen, weshalb es anschaulich sein kann, die Schwingungen der Sterne als Musikdatei greifbarer zu machen. Zwar beträgt die Frequenz der Schwingung mit der größten Amplitude im Fall der Sonne 3090  $\mu\text{Hz}$ , was außerhalb des hörbaren Bereichs liegt, aber wie auch beispielsweise beim Walgesang kann man die Töne ja transponieren. Emma Willet und Rafail Panagi haben dies [für einzelne Sterne](#) gemacht. Auf der Seite von Kolláth Zoltán findet man darüber hinaus „[The Music of the Spheres](#)“, die aus Schwingungen vieler Sterne zusammengestellt wurde.

Wer sich selbst einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften der bestätigten Exoplaneten verschaffen möchte, findet die Daten auf [exoplanet.eu](#) wie auch auf [Wikipedia](#).

Auf der Seite der [NASA](#) gibt es zu TESS eine Menge spannender Inhalte in englischer Sprache.

Sowohl auf [Youtube](#) als auch auf der Seite der [NASA](#) gibt es unvertonte (interaktive) Animationen, die die Transitmethode veranschaulichen (auch [andere Verfahren](#) werden hier erklärt).

## Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

1. Versucht qualitativ zu begründen, warum  $R_P$  und  $R_\star$  in der Gleichung für den relativen Helligkeitsabfall beide zum Quadrat vorkommen! Tipp: Denkt an die Fläche eines Kreises.
2. Berechnet den relativen Helligkeitsabfall für einen Planeten mit der Größe des Jupiters, der einen Stern mit einem Radius von  $1 R_\odot$  umkreist! Die Radien vom Jupiter und von der Sonne betragen jeweils  $6,9911 \cdot 10^7$  m und  $6,957 \cdot 10^8$  m. Wiederholt diese Berechnung für einen Planeten mit der Größe der Erde. Der Erdradius beträgt  $6,3781 \cdot 10^6$  m.
3. Welche Werte hättet ihr in Aufgabe 2 erhalten, wenn  $R_\star$  gleich  $2 R_\odot$  statt  $1 R_\odot$  gewesen wäre? Beschreibt, ohne weitere Zahlen in die Formel einzusetzen, also qualitativ, wie sich der Helligkeitsabfall für Sterne und Planeten mit unterschiedlichen Größen verhält!
4. Ist es einfacher einen erdähnlichen Planeten oder einen Gasriesen auszumachen? Begründet eure Antwort anhand der Antworten auf die Aufgaben 1 bis 3.
5. Berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass die Bahnebene eines Planeten die Sichtlinie zwischen seinem Wirtstern und einem Beobachter schneidet, unter den Annahmen, dass der Planet den Stern in einem Abstand von  $0,4$  AE umkreist und dass der Stern einen Radius von  $0,8 R_\odot$  hat! Tipp: Eine Astronomische Einheit (AE) entspricht  $149.597.870.700$  m (rund  $150 \cdot 10^9$  m). Diese Information braucht ihr aber nicht.  
Wiederholt diese Berechnung für  $0,04$  AE. Beschreibt, ohne weitere Werte in die Formel einzusetzen, wie sich die Wahrscheinlichkeit ändert, wenn der Planet sich näher am Stern befindet!
6. Bis April 2021 wurden mehr als 4000 Exoplaneten erfasst und bestätigt (dazu kommen noch etliche tausend Kandidaten, bei denen die Daten noch nicht schlüssig sind). Diese Planeten sind alle in Abb. 3 aufgeführt (siehe nächste Seite). Auf einer Achse ist die Umlaufzeit angegeben. Diese kann leicht bestimmt werden: Man misst die Zeit zwischen einem Transit und dem nächsten Transit desselben Planeten. Auf der anderen Achse ist die Masse des *Planeten* angegeben. Wie beim Sternradius können Forscher\*innen aus den Schwingungsmessungen die Masse des *Sterns* berechnen, und auch die große Halbachse der Umlaufbahn ( $a$ ) lässt sich aus den Daten bestimmen. Aber wie berechnet man die Masse des Planeten, wenn man die Masse des Sterns, die Umlaufzeit und die Halbachse kennt?
7. In Abb. 3 sind Planeten, die mit der Transitmethode entdeckt wurden, orange markiert. Wenn man sich die Abbildung anschaut, fällt einem auf, dass fast alle diese Planeten eine kürzere Umlaufzeit als die Erde haben. Wie kommt das? Die Tatsache, dass so viele Planeten in der Nähe ihres Sterns gefunden wurden, bedeutet nicht, dass es in anderen Sternensystemen hauptsächlich Planeten gibt, die sich in der Nähe des Sterns befinden. Wieso nicht?
8. Planeten, die die gleiche Masse wie die Erde aufweisen, haben auch ungefähr den gleichen Radius. Planeten, deren Massen dem von Jupiter näher kommen, sind wie Jupiter Gasriesen. Daraus lässt sich schließen, dass in Abb. 3 sehr viele Gasriesen vorkommen. Das heißt aber nicht, dass Gasriesen in Planetensystemen genauso häufig vorkommen wie unter den bestätigten Planeten in der Abbildung. Warum nicht (Tipp: Aufgabe 4)?

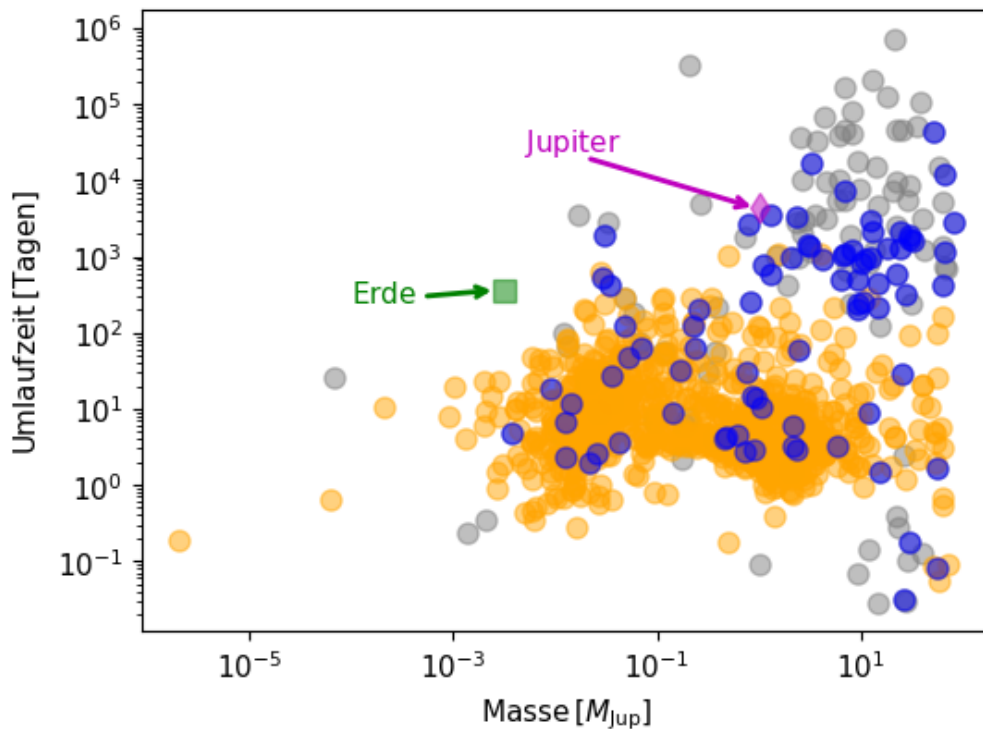


Abbildung 3: Umlaufzeit und Masse (in Einheiten der Jupitermasse,  $M_{\text{Jup}}$ ) der bis April 2021 bestätigten Exoplaneten. Planeten, die mit der Transitmethode und Radialgeschwindigkeitsmethode (siehe Aufgabe 9) detektiert wurden, sind orange bzw. blau markiert. Planeten, die mit anderen Verfahren erfasst wurden, sind grau markiert. Die Erde und der Jupiter wurden zum Vergleich der Grafik hinzugefügt. Beachtet, dass es sich hier um eine *doppelt-logarithmische* Darstellung handelt. Die zugrundeliegenden Daten stammen von [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu), wo auch interaktive Grafiken zu finden sind, die es erlauben die Eigenschaften der Planeten weiter zu erkunden (siehe auch [Wikipedia](https://de.wikipedia.org) und die Seite der [NASA](https://www.nasa.gov)). ©: Andreas Jørgensen, CC BY.

9. In Abb. 3 sind mehrere Planeten blau markiert, die mit der sogenannten Radialgeschwindigkeitsmethode aufgespürt wurden. 19 Prozent aller bis heute bestätigten Exoplaneten wurden mit dieser Methode entdeckt – die Transitmethode kann sich dahingegen mit mehr als 72 Prozent aller bestätigten Exoplaneten schmücken. Die Radialgeschwindigkeitsmethode wurde übrigens auch von Michel Mayor und Didier Queloz verwendet, die damit den ersten Exoplaneten um einen sonnenähnlichen Stern entdeckten und dafür 2019 den [Nobelpreis](https://www.nobelprize.org) erhielten. Findet Informationen über das Radialgeschwindigkeitsverfahren. Welche physikalischen Effekte kommen bei dieser Methode ins Spiel? Könnt ihr es euren Mitschülern mit Formeln und/oder Abbildungen verständlich erklären? Könnt ihr das Verfahren in einfachen Worten wiedergeben?
10. In Abb. 3 sind einige Planeten grau markiert. Diese wurden durch andere Verfahren entdeckt. Findet heraus, welche anderen Methoden zum Nachweis von Exoplaneten zur Verfügung stehen!
11. Taucht mit WIS tiefer ins Thema ein, indem ihr die Suche nach Leben und habitablen Zonen diskutiert: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/erdaehnliche-planeten-in-der-milchstrasse-auf-der-suche-nach-leben/1421049!>
12. [Alpha Centauri A](https://de.wikipedia.org/wiki/Alpha_Centauri_A) ist einer von drei Sternen in einem Mehrfachsystem. Für diesen Stern betragen die Frequenz der Schwingung mit der größten Amplitude und der große Frequenzabstand  $2300 \mu\text{Hz}$  bzw.  $106 \mu\text{Hz}$ . Die Oberflächentemperatur beträgt  $5795 \text{ K}$ . Berechnet daraus den Radius des Sterns. Schlagt auch bei Wikipedia nach! Stimmt euer Wert (so ungefähr)?
13. Informiert euch über die Asteroseismologie (Sternenbeben) und versucht die gefundenen Informationen leicht verständlich zusammenzufassen!

## Lösungen zu den Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

- Zu 1.** Sowohl der Stern als auch der Planet werden am Nachthimmel als Scheiben wahrgenommen. Die Fläche einer Scheibe mit Radius  $R$  ist  $\pi \cdot R^2$ . Unter der vereinfachten Annahme, dass die Leistungsdichte der Abstrahlung überall auf der Sternscheibe gleich ist, müssen wir lediglich die Flächen der beiden Scheiben miteinander vergleichen, um in erster Näherung den Helligkeitsabfall abzuschätzen. Diese Annahme trifft zu, falls wir annehmen, dass der Stern wie ein schwarzer Körper strahlt (vgl. das [Stefan-Boltzmann-Gesetz](#)).
- Zu 2.** Für den Jupiter und die Erde erhalten wir jeweils einen Helligkeitsabfall von 0,010 und  $8,4 \cdot 10^{-5}$ .
- Zu 3.** Die Werte wären um einen Faktor 4 kleiner. Je größer der Planet und je kleiner der Stern, desto größer ist der relative Helligkeitsabfall.
- Zu 4.** Es ist einfacher, einen Gasriesen zu entdecken, da er zu einer größeren relativen Änderung in der Helligkeit führt. Die erhobenen Daten werden von Rauschen beeinträchtigt und die Signale kleinerer Planeten können darin verloren gehen. Mit anderen Worten, ist eine Erfassung des Signals erst oberhalb einer gewissen Erkennbarkeitsschwelle möglich, und es ist für Gasriesen leichter, diese Schwelle zu überschreiten.
- Zu 5.** Man erhält jeweils eine Wahrscheinlichkeit von 0,01 und 0,1, also von 1 und 10 Prozent. Je näher der Planet am Stern kreist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Bahnebene die Sichtlinie kreuzt.
- Zu 6.** Man benutzt hierzu die keplerschen Gesetze.
- Zu 7.** Wie bei Frage 5 angeführt, ist es wahrscheinlicher, dass ein Planet entdeckt wird, wenn er sich in der Nähe des Sterns befindet. Es handelt sich hier also um eine Verzerrung bzw. einen Bias.
- Zu 8.** Gasriesen sind wegen ihres größeren Radius leichter zu entdecken als Gesteinsplaneten wie die Erde (siehe Frage 4). Hier handelt es sich somit um eine systematische Überschätzung.
- Zu 9.** Die Radialgeschwindigkeitsmethode basiert auf dem Dopplereffekt. Sowohl der Stern als auch der Planet bewegen sich um ihren gemeinsamen Massenschwerpunkt, was bedeutet, dass sich der Stern durch die Anwesenheit des Planeten bedingt ebenfalls bewegt. Die Bewegungen des Sterns werden durch Rot- und Blauverschiebungen der Spektrallinien erkennbar und lassen somit auf die Anwesenheit des Planeten schließen.
- Zu 10.** Es gibt noch weitere Methoden, um Planeten nachzuweisen. Beispielsweise gibt es die astrometrische Methode, den Mikrolinseneffekt, die Lichtlaufzeit-Methode und die direkte Beobachtung. Diese Aufgabe ist für selbständige Projekte geeignet.
- Zu 11.** Auch diese Aufgabe kann als Ausgangspunkt für selbständige Projekte dienen.
- Zu 12.** Setzt man die Zahlen in die Formel ein, erhält man  $1,21 R_{\odot}$ . Bei Wikipedia findet man den Wert  $1,224 R_{\odot}$ . Der Wert bei Wikipedia ergibt sich aus einem direkten Vergleich zwischen den asteroseismischen Daten (Schwingungsmessungen) und Sternmodellen (detaillierte Simulationen vom Aufbau individueller Sterne).
- Zu 13.** Auch diese Aufgabe kann als Ausgangspunkt für selbständige Projekte dienen.