

Woraus bestehen die Atmosphären von Exoplaneten?

In Bezug auf den Beitrag „Dicke Luft um 55 Cancri e“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 1/2025, Rubrik „Nachrichten“, S. 10, WIS-ID: 1571262, Zielgruppe: Mittelstufe, Oberstufe

Markus Nielbock, Haus der Astronomie, Heidelberg

Weit über 5000 Planeten sind heute bekannt, die andere Sterne als die Sonne umkreisen. Doch woraus bestehen sie? Woher wissen wir, dass sich eine nähere Untersuchung auch in Bezug auf den Nachweis von Lebensspuren auf diesen Planeten lohnt? Auf der Basis der Detektionsmethode mittels Planetentransit lässt sich mit der periodischen Lichtabschwächung des Zentralsterns abhängig vom beobachteten Spektralbereich ein Absorptionsspektrum der Atmosphäre ermitteln und daraus deren Zusammensetzung bestimmen. Der WIS-Beitrag greift diese moderne Messmethode auf, indem sie Schritt für Schritt basierend auf echten Beobachtungsdaten hergeleitet und ausgewertet wird. Ein anschaulicher Demonstrationsversuch erläutert den Vorgang. Neben den fachlichen Hintergründen für die Lehrpersonen bietet dieser Beitrag für die Schülerinnen und Schüler eine Mischung aus Eigenarbeit, angeleiteten Aufgaben, Interpretation und Kontrolle des Verständnisses. Die Grundlagen zur Detektionsmethode per Planetentransit werden als bekannt vorausgesetzt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten	Exoplanet , Detektionsmethode , Transitmethode , Lichtkurve , Phasenkurve , Radius , Transitspektrum , Atmosphäre , Zusammensetzung
Physik	Optik, Mechanik	Teleskop , Kreisbahn , Umlaufperiode , Bedeckung , Wellenlänge , Spektrum , Modell
Fächerverknüpfung	Astronomie – Mathematik	Radius , Kreis , Fläche , Koordinatensystem , Dezimalzahl , Graph , Datenpunkt , Wertepaar , Mittelwert
	Astronomie – Chemie	Summenformel , Aggregatzustand , Gas , Atom , Molekül
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen, Erkenntnis und Kommunikation), Lehr-/Sozialformen, Unterrichtsmittel	Berechnungen und Vergleiche durchführen , Werte zuordnen , Diskussion , Arbeitsblatt , Demonstrationsversuch , Diagramm füllen



Künstlerische Darstellung des Exoplaneten WASP-39 b. (Bild: NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted (STScI), <https://webb-telescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-060>, public domain)

Inhaltsverzeichnis

1	Handreichung für die Lehrperson	3
1.1	Exoplaneten	3
1.2	Detektionsmethoden	3
1.3	Transit, Lichtkurven, Phasenkurven und Planetenradien	4
1.3.1	<i>Transitmessung</i>	4
1.3.2	<i>Transittiefe und Planetenradius</i>	5
1.3.3	<i>Phasenkurve</i>	6
1.4	Transitspektroskopie	7
1.5	Vorbemerkungen zu den Übungen	9
2	Übungsteil für Schülerinnen und Schüler	11
2.1	Benötigte Hilfsmittel	11
2.2	Fragen, Antworten und Diskussion	11
2.3	Auswertung Lichtkurve.....	11
2.3.1	<i>Qualitative Auswertung</i>	11
2.3.2	<i>Quantitative Auswertung (Rechnerische Methode)</i>	13
2.4	Auswertung Phasenkurve	14
2.4.1	<i>Zusammenhang zwischen Helligkeitsabnahme und Planet</i>	14
2.4.2	<i>Radiusbestimmung mit Phasenkurve</i>	14
2.5	Transitspektroskopie	17
2.5.1	<i>Exkurs Spektrum</i>	17
2.5.2	<i>Einfluss der Planetenatmosphäre</i>	17
2.5.3	<i>Demonstrationsversuch</i>	18
2.5.4	<i>Transitspektrum</i>	19
2.5.5	<i>Realistisches Beispiel einer Planetenatmosphäre: WASP-39 b</i>	20
3	Lösungsbeispiele.....	23
4	Anhang.....	26
5	Literaturverzeichnis	26

1 Handreichung für die Lehrperson

1.1 Exoplaneten

Seit Mitte der 1990er Jahre, als die ersten Planeten entdeckt wurden, die andere Sterne außerhalb des Sonnensystems umkreisen [1], [2], sind bis Ende 2024 etwa 5800 Exoplaneten nachgewiesen [3]. Wegen den großen Entfernungen und enormen Helligkeitsunterschieden zwischen den Zentralsternen und den Planeten werden sie nur selten durch direkte Abbildung auf Teleskopaufnahmen gefunden. Unter den indirekten Methoden haben sich im Laufe der Jahrzehnte insbesondere zwei als besonders erfolgreich erwiesen: die Radialgeschwindigkeitsmethode¹ und die Transitmethode².

1.2 Detektionsmethoden

An dieser Stelle werden die beiden vorherrschenden Detektionsmethoden nur kurz angerissen. Ausführlichere Darstellungen mit dazu passenden Übungen befinden sich in anderen WIS-Beiträgen [4], [5], [6], [7].

Die Radialgeschwindigkeitsmethode nutzt den optischen Dopplereffekt. Dabei verschiebt sich das Lichtspektrum eines Sterns abhängig von der Radialkomponente der Geschwindigkeit der Quelle. Bewegt sich die Quelle auf den Detektor zu, erscheinen das Licht und somit die Spektrallinien im gemessenen Spektrum zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben. Man spricht dann von einer Blauverschiebung. Entfernt sich die Quelle, erfährt das Spektrum eine Verschiebung zu größeren Wellenlängen, und der Effekt wird als Rotverschiebung bezeichnet.

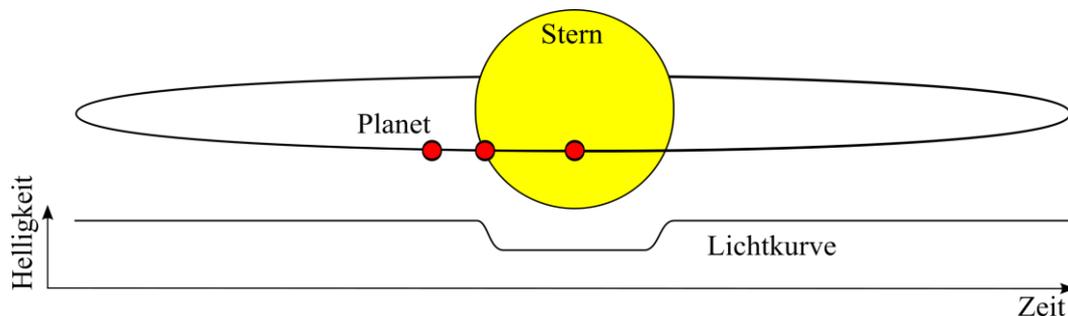


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines Planetentransits. Wenn der Stern aus der Sicht des Beobachters die Sternscheibe kreuzt, sinkt die Helligkeit des Sterns. (Quelle: Planetary transit.svg: Nikola Smolenski derivative work (translation): Carbenium (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planetary_transit_de.svg), „Planetary transit de“, Lizenz: [CC BY-SA 3.0](#))

Während die Radialgeschwindigkeitsmethode eine Abschätzung für die Planetenmasse liefert, können die Durchmesser oder Radien durch die Transitmethode ermittelt werden. Sie beruht darauf, dass die Bahn eines zu vermessenden Exoplaneten um den Zentralstern gerade so geneigt ist, dass sie von uns aus gesehen den Stern kreuzt. Der Planet verdeckt einen Teil der Sternoberfläche und verursacht damit eine Verringerung der Sternhelligkeit. In erster Näherung ist die Reduktion der empfangenen Strahlungsdichte vom Verhältnis der Querschnittsflächen des Planeten und des Sterns abhängig. Aus dem Verlauf der Lichtkurve, der Auftragung der Sternhelligkeit gegen die Zeit, können jedoch weitere Parameter wie die Neigung der Planetenebene, die Umlaufperiode und mit der Masse des Sterns die Bahnhalbachsen sowie mit der Planetenmasse seine mittlere Dichte bestimmt werden [8].

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Exoplanet#Radialgeschwindigkeitsmethode>

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>

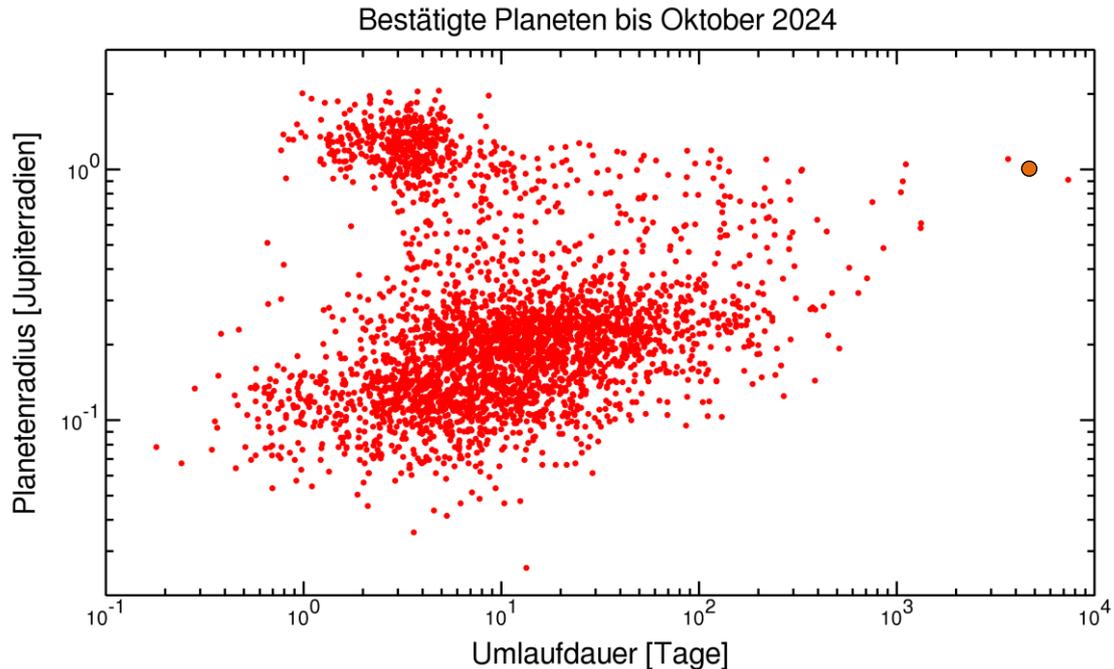


Abbildung 1.2: Darstellung aller bis zum 31.10.2024 mittels Transitmethode gefundenen Exoplaneten. Aufgetragen sind der gemessene Planetenradius in Jupiterradien gegen die Umlaufperiode in Tagen. Zum Vergleich zeigt der braune Kreis die Werte des Jupiters. (Quelle: NASA Exoplanet Archive, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>)

Die Transitmethode ist das erfolgreichste Verfahren zur Suche nach Exoplaneten, da sie sehr effizient und mit vergleichsweise geringem Aufwand ganze Himmelsfelder nach Transitsignalen absuchen kann. Besonders hat die Mission des Weltraumteleskops Kepler³ für einen enormen Zuwachs an Exoplaneten gesorgt [9], [10].

1.3 Transit, Lichtkurven, Phasenkurven und Planetenradien

1.3.1 Transitmessung

Mit Transitmessungen können bei geeigneter Geometrie der Planetenbahnen die Radien von Exoplaneten ermittelt werden. Dieser Umstand stellt den ersten Schritt zur detaillierten Charakterisierung von Exoplaneten dar, insbesondere ihren Atmosphären. Wir werden später sehen, dass die Lichtabschwächung durch die Gase in den Atmosphären bei verschiedenen Spektralbereichen unterschiedlich stark ausfällt. Atome und Moleküle absorbieren das Sternlicht bei bestimmten Wellenlängen.

³ [https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler_\(Weltraumteleskop\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler_(Weltraumteleskop))

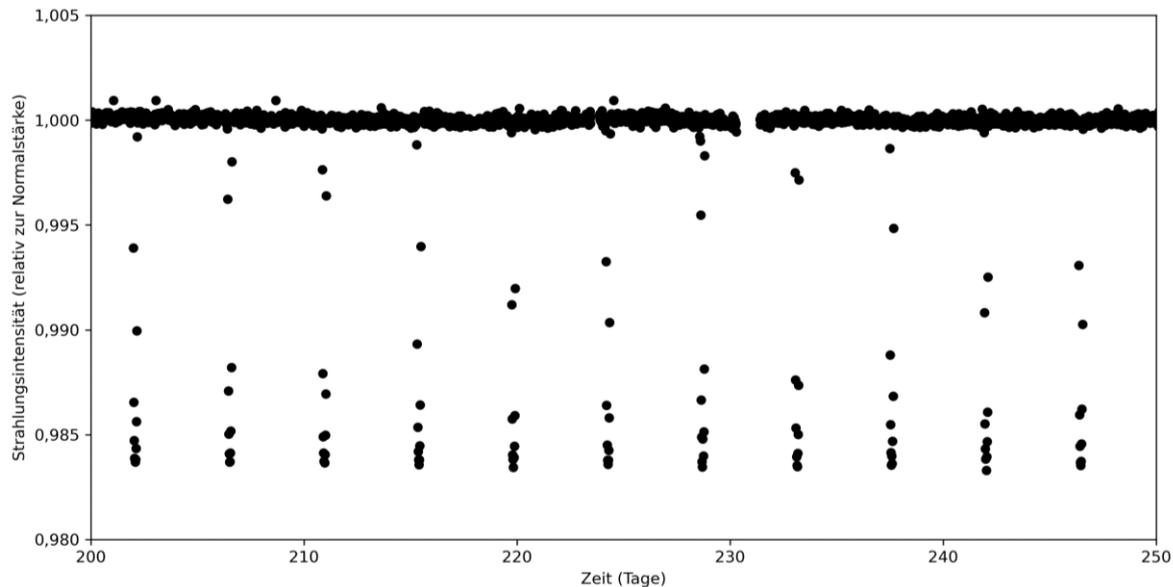


Abbildung 1.3: Mit dem Weltraumteleskop Kepler gemessene Lichtkurve des Sterns Kepler-12, normiert auf die unverfinsterte Strahlungsintensität. Die ansonsten konstante Helligkeit sinkt etwa alle fünf Tage um ungefähr 1,5 % ab. Mit einer genaueren Auswertung lassen sich die Bahnperiode und das Verhältnis der Radien des Planeten und des Sterns bestimmen. Mit zusätzlichen Eigenschaften des Sterns folgen hieraus der Radius des Planeten und die große Bahnhalbachse. (Datenquelle: https://exo.mast.stsci.edu/exomast_planet.html?planet=Kepler-12%20b)

Messreihen zur Bestimmung der Sternhelligkeit ergeben sogenannte Lichtkurven. Darunter versteht man die Auftragung der gemessenen Helligkeiten oder Intensitäten gegen die Zeit. Lichtkurven zeigen daher eine etwaige Veränderung der Helligkeit an.

Abbildung 1.3 zeigt einen Ausschnitt einer mit dem Weltraumteleskop Kepler gemessenen Lichtkurve des Sterns Kepler-12⁴. Die zeitlich veränderliche Lichtintensität ist auf die unverfinsterte Intensität des Sterns normiert, so dass die meisten Messpunkte um die Zahl 1 streuen. Dadurch kann die relative Abnahme der Helligkeit während eines Planetentransits unmittelbar abgelesen werden.

1.3.2 Transittiefe und Planetenradius

Die Abnahme in der Strahlungsintensität des Sterns wird Transittiefe genannt. Sie ist eine dimensionslose Größe, die meistens in Prozent (%) oder *parts per million* (ppm) angegeben und mit dem Formelzeichen ΔF bezeichnet wird.

Die Transittiefe hat ihre geometrische Entsprechung in dem Verhältnis der strahlenden Querschnittsflächen des Sterns während und außerhalb des Transits (siehe Abbildung 1.1). Wir suchen nun also einen Ausdruck für die Differenz der Intensität (auch Strahlungsflussdichte oder Bestrahlungsstärke⁵ genannt) zwischen den Situationen außerhalb und während des Transits relativ zur unverfinsterten Intensität des Sterns. In der Astronomie hat sich als Formelzeichen für die Intensität (Flussdichte) das F etabliert. Die mathematische Herleitung lautet wie folgt:

A_p : Querschnittsfläche des Planeten

A_* : Querschnittsfläche des Sterns

A_{tr} : Leuchtende Fläche während des Transits

F_* : Intensität des Sterns

F_{tr} : Intensität während des Transits

⁴ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/Kepler-12>

⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Bestrahlungsstärke>

$$\Delta F = \frac{F_* - F_{\text{tr}}}{F_*} = 1 - \frac{F_{\text{tr}}}{F_*}$$

Dabei ist das Verhältnis der Intensitäten proportional zu den leuchtenden Flächen außerhalb und während des Transits. Somit gilt:

$$\frac{F_{\text{tr}}}{F_*} = \frac{A_{\text{tr}}}{A_*} = \frac{A_* - A_{\text{p}}}{A_*} = 1 - \frac{A_{\text{p}}}{A_*}$$

Eingesetzt folgt:

$$\Delta F = 1 - \frac{F_{\text{tr}}}{F_*} = 1 - \frac{A_{\text{tr}}}{A_*} = 1 - \frac{A_* - A_{\text{p}}}{A_*} = 1 - \left(1 - \frac{A_{\text{p}}}{A_*}\right) = \frac{A_{\text{p}}}{A_*}$$

Die Transittiefe entspricht also dem Verhältnis der Querschnittsflächen des Planeten und des Sterns. Nehmen wir vereinfachend an, dass diese Querschnittsflächen Kreise sind, können wir die Radien R einführen und schreiben:

$$\begin{aligned} \Delta F &= \frac{A_{\text{p}}}{A_*} = \frac{\pi \cdot R_{\text{p}}^2}{\pi \cdot R_*^2} = \frac{R_{\text{p}}^2}{R_*^2} \\ &\Rightarrow \sqrt{\Delta F} = \frac{R_{\text{p}}}{R_*} \end{aligned}$$

Mit dem Sternradius, der auf andere Weise bestimmt wird und meistens in Sonnenradien R_{\odot} gemessen wird, erhalten wir den Planetenradius. Dieser wird gewöhnlich in Erd- oder Jupiterradien⁶ angegeben.

1.3.3 Phasenkurve

Um die Präzision bei der Ermittlung der Transittiefe zu verbessern, werden alle Minima einer Lichtkurve übereinander geschoben. Im Ergebnis erhält man dadurch eine sogenannte Phasenkurve, da hier nicht mehr der zeitliche Verlauf einer Messung, sondern der Verlauf eines sich wiederholenden Ereignisses im Mittelpunkt steht. So wie der Mond uns in regelmäßigen Abständen immer wieder dieselbe Phase (z. B. Vollmond) zeigt, entspricht der Zentralpunkt eines Transits ebenso einer wiederkehrenden Phase. Statt der Zeit wird also der Phasenverlauf aufgeführt. Eine komplette Phase entspricht einem Intervall vom Wert 1. Meistens läuft die Phasenkurve jedoch von -0,5 bis +0,5, wobei dem Zentralpunkt des Transits die Phase 0 zugeordnet wird. Diese Überlagerung von zahlreichen vergleichbaren Ereignissen verbessert die zeitliche Abdeckung des Helligkeitsverlaufs und erhöht die Genauigkeit bei der Bestimmung der Transittiefe.

⁶ $\frac{R_{\odot}}{R_J} = 9,7401$; $\frac{R_J}{R_E} = 11,2215$

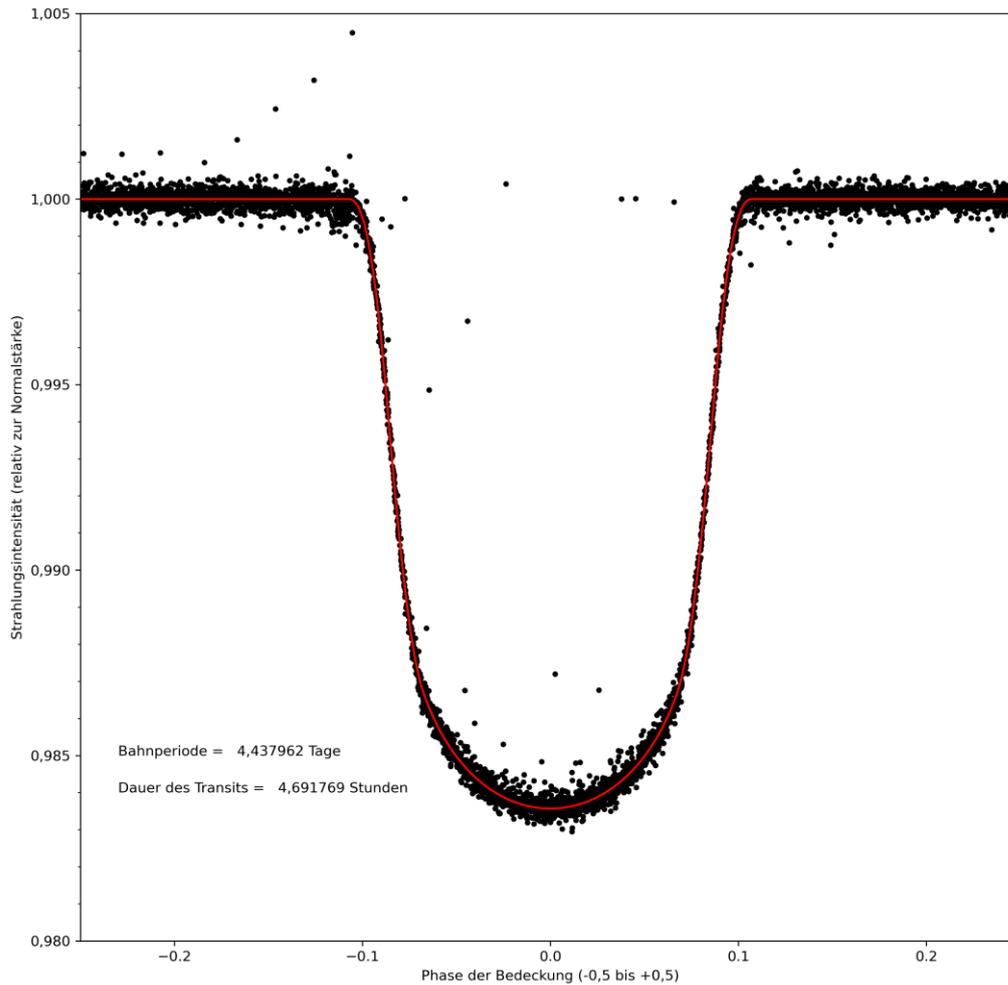


Abbildung 1.4: Phasenkurve des Helligkeitsverlaufs des Sterns Kepler-12 während eines Planetentransits. Die Phase 0 gibt den Zentralpunkt des Transits mit der stärksten Verdunklung an. Die rote Kurve ist ein an die Daten angepasstes Modell für den wahren Verlauf. Die Transittiefe beträgt in diesem Fall 1,64 %. (Quelle: https://exo.mast.stsci.edu/exomast_planet.html?planet=Kepler-12%20b)

1.4 Transitspektroskopie

Wie die meisten Planetenjäger-Teleskope nutzt Kepler nahezu den kompletten Spektralbereich des Lichts (Weißlicht). Das hilft bei der Detektion von schwachen Signalen. Dünne Atmosphären lassen das Licht meistens nahezu ungehindert durch. Sie sind also für das Sternlicht weitgehend transparent und tragen daher zur Radiusbestimmung nicht bei. In dieser Form entspricht der ermittelte Radius dem undurchsichtigen Teil des Planeten. Bei Gesteinsplaneten ist das meistens nur der feste Planetenkörper.

Abhängig von der Zusammensetzung absorbieren einzelne Gase allerdings elektromagnetische Strahlung bei charakteristischen Frequenzen oder Wellenlängen. Die Transittiefe fällt somit stärker aus, wenn die Beobachtungen auf diese Spektralbereiche begrenzt werden. Auf diese Weise lässt sich die Zusammensetzung der Atmosphäre rekonstruieren. Diese Art von Beobachtung wird Transitspektroskopie genannt. Das Auftragen der Transittiefen gegen die jeweils dazugehörige Wellenlänge ergibt ein Transitspektrum. Praktisch ist das ein in vertikaler Richtung gespiegeltes Absorptionsspektrum der Atmosphäre.

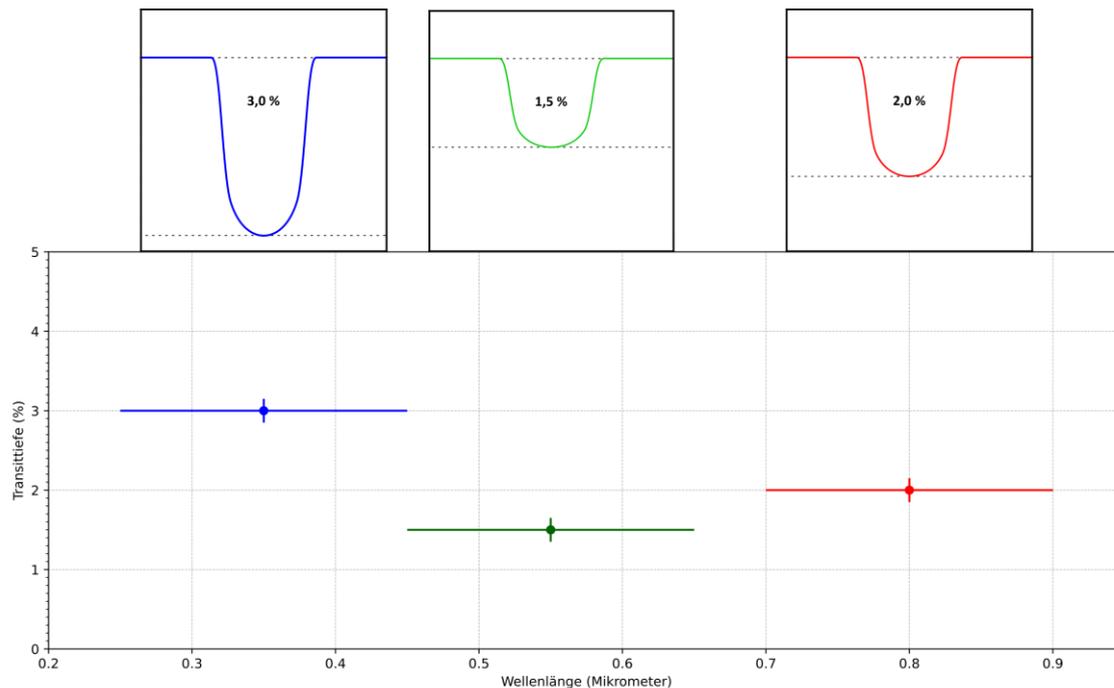


Abbildung 1.5: Schematisches Beispiel für die Erstellung eines Transitspektrums. Die Phasenkurven bei einzelnen Spektralbereichen (blau, grün, rot) ergeben unterschiedliche Transittiefen. Trägt man sie entsprechend ihrer jeweiligen Wellenlänge in einem Diagramm auf, ergibt sich ein Transitspektrum. In diesem Fall wird der Spektralbereich des sichtbaren Lichts abgedeckt. Die spektrale Auflösung ist hier jedoch relativ gering. Die Fehlerbalken illustrieren die typischen Messunsicherheiten. Die Unsicherheit in der Wellenlänge entspricht der typischen Bandbreite der üblicherweise verwendeten optischen Filter. (Quelle: M. Nielbock, Lizenz: [CC BY 4.0](#))

Abbildung 1.5 zeigt ein schematisches Beispiel dafür, wie aus den Transittiefen, die bei unterschiedlichen Wellenlängen (Farben) ermittelt wurden, ein Transitspektrum konstruiert wird. Dort ist zu erkennen, dass die Atmosphäre des Planeten im sichtbaren Licht nicht überall gleich stark das hindurchscheinende Sternlicht absorbiert. Das Beispiel simuliert Helligkeitsmessungen in drei Breitbandfiltern, wie es in der Astronomie üblich ist, wenn die Helligkeit von Sternen aus Bildern ermittelt wird.

Der Vorteil ist, dass möglichst viel Licht die optischen Filter passiert und damit das Detektorsignal entsprechend hoch ist. Die Abdeckung ist für eine sinnvolle Interpretation jedoch kaum ausreichend. Daher werden entweder Serien von Aufnahmen mit Schmalbandfiltern angefertigt, die den gewünschten Wellenlängenbereich gut abdecken, oder man setzt Spektrografen ein, die das Licht aufspalten. Die aufgenommenen Daten lassen sich damit nahezu beliebig zeitlich und spektral kombinieren.

Abbildung 1.6 zeigt am Beispiel vom Exoplaneten WASP-39 b⁷, wie mit verbesserter spektraler Abdeckung im Transmissions- bzw. Absorptionsspektrum einzelne Merkmale sichtbar werden. Die zeitabhängige Spektroskopie ermittelt Lichtkurven bei sehr vielen Wellenlängen und damit Transittiefen, die ein Absorptionsspektrum der Atmosphäre ergeben [11], [12], [13], [14], [15]. Beachten Sie, dass in diesem Beispiel die Transittiefen lediglich zwischen 2,0 und 2,3 % schwanken. Modellrechnungen können

⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/WASP-39>

damit die chemischen Komponenten der Planetenatmosphäre ermitteln, die die wellenlängenabhängige Abschwächung des Sternlichts während des Transits verursachen.

1.5 Vorbemerkungen zu den Übungen

Für diese Übung werden grundlegende Kenntnisse zu den Mechanismen der Detektionsmethode per Planetentransit vorausgesetzt. Die SuS sollten bereits wissen, dass die Transitmethode nicht nur Planeten nachweist, sondern auch prinzipiell etwas über die Größe der Planeten und ihre Umlaufdauer verrät. Hilfreich ist es auch, wenn das Konzept des Spektrums bekannt ist, wenigstens aber, dass man Licht in seine Farbbestandteile zerlegen kann. Ein gewisses Grundverständnis zur Geometrie von Flächen sowie die Grundprinzipien einer Kreisbewegung (Umlaufdauer, Periode) sind ebenfalls nützlich. Mathematisch sind einfache Algebra und Bruchrechnen ausreichend. Grundlegende Englischkenntnisse sind vorteilhaft.

Die Übungen setzen sich zusammen aus Fragen, die die aktuellen Kenntnisse auffrischen und zu neuen Zusammenhängen hinleiten, der Interpretation eines Demonstrationsversuchs, der grafischen Konstruktion und Auswertung von Diagrammen und der Zuordnung von Größen darin.

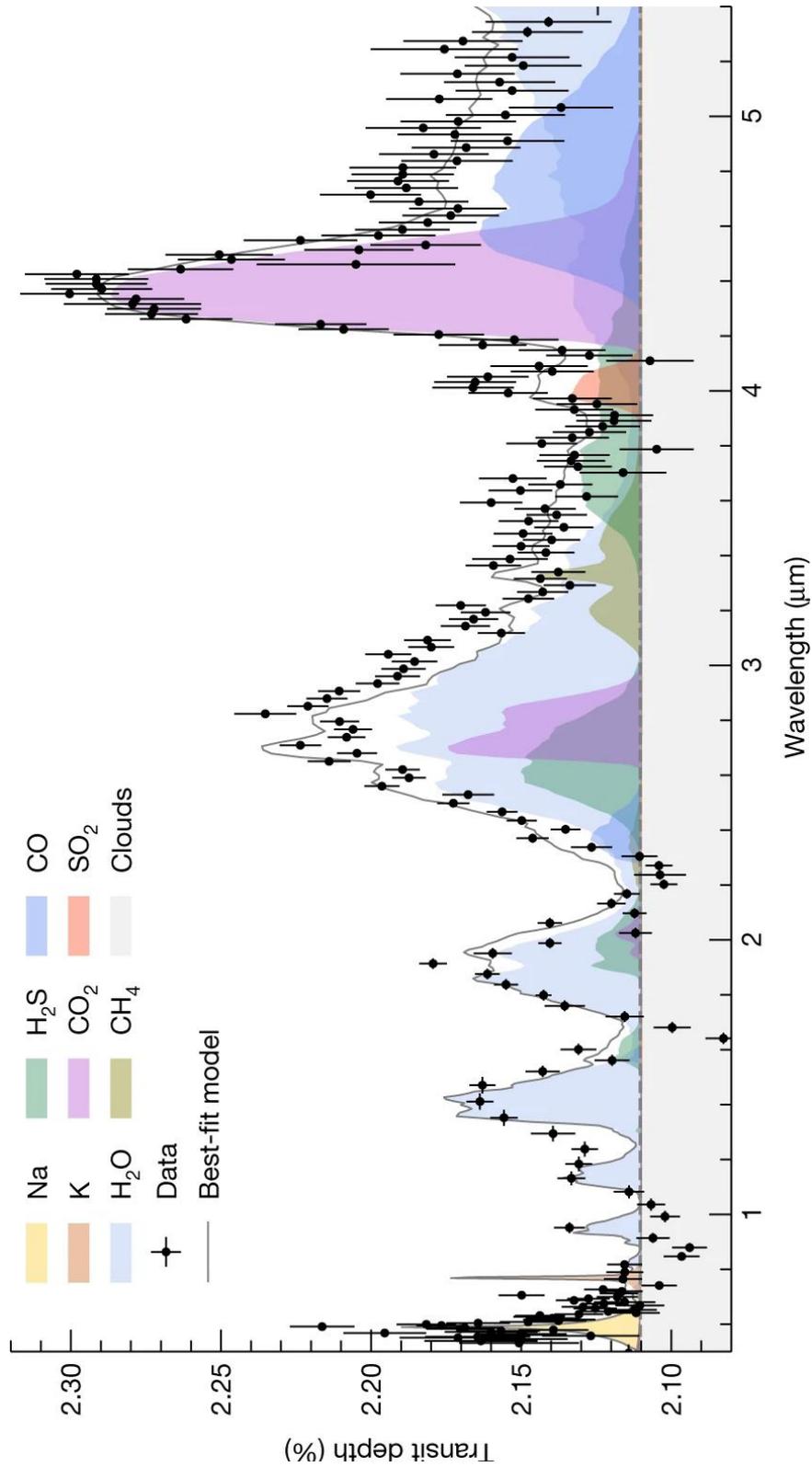


Abbildung 1.6: Transitspektrum des Exoplaneten WASP-39 b und ein Modell, das die spektralen Anteile verschiedenen Atomen und Molekülen in der Planetenatmosphäre zuordnet .

(Quelle: Rustamkulov, Z., Sing, D.K., Mukherjee, S. et al., <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05677-y>, Lizenz: [CC BY 4.0](#))

2 Übungsteil für Schülerinnen und Schüler

2.1 Benötigte Hilfsmittel

- Geodreieck, hilfsweise ein Lineal
- Bleistift
- Taschenrechner

2.2 Fragen, Antworten und Diskussion

Frage: Wie nennt man Planeten, die andere Sterne als die Sonne umkreisen?

Frage: Woraus bestehen Planeten, z. B. die im Sonnensystem?

Frage: Was passiert mit dem Licht eines Sterns, wenn von uns aus gesehen ein Planet an ihm vorbeizieht?

Frage: Woran kann es liegen, wenn die gemessene Helligkeit eines Sterns regelmäßig sinkt?

2.3 Auswertung Lichtkurve

2.3.1 Qualitative Auswertung

Helligkeitsmessungen, die während einer Messdauer aufgenommen werden, können als sogenannte Lichtkurve dargestellt werden. Hierzu werden die Datenpunkte der Messgröße gegen die Zeit aufgetragen. Abbildung 2.1 ist ein Beispiel für solch einen Datensatz, der mit dem Weltraumteleskop Kepler⁸ aufgenommen wurde. Um Veränderungen in der Helligkeit (präziser: Strahlungsintensität) einfacher ablesen zu können, wurden die Werte aller Datenpunkte durch das Signal des Sterns geteilt. Dadurch erhalten sie im Normalfall im Durchschnitt den Wert 1. Werte kleiner als 1 geben dann an, wie stark das Signal abnimmt. Um die Werte in Prozent anzugeben, müssen sie lediglich mit 100 multipliziert werden. So lässt sich sofort ablesen, auf wie viel Prozent der Normalhelligkeit der Stern dunkler wird.

Abbildung 2.1 zeigt einen Ausschnitt von Messdaten des Weltraumteleskops Kepler. Gemessen wurde die Helligkeit des Sterns Kepler-12 über mehrere Tage.

Aufgabe: Beschreibe das Diagramm in Abbildung 2.1 und erkläre den zeitlichen Verlauf der Messung.

Frage: Die sich wiederholenden Minima in der Sternhelligkeit werden durch einen Planeten (Name: Kepler-12 b) hervorgerufen, der den Stern umkreist und die Sternoberfläche regelmäßig bedeckt. Wie oft ist der Planet im angegebenen Zeitfenster um Stern herumgelaufen?

Aufgabe: Erkläre, wie du die Umlaufdauer des Planeten bestimmen kannst.

⁸ Das Weltraumteleskop Kepler hat nach Helligkeitsveränderungen von Sternen gesucht, die durch Planeten hervorgerufen werden.

Kepler-12b - Lichtkurve

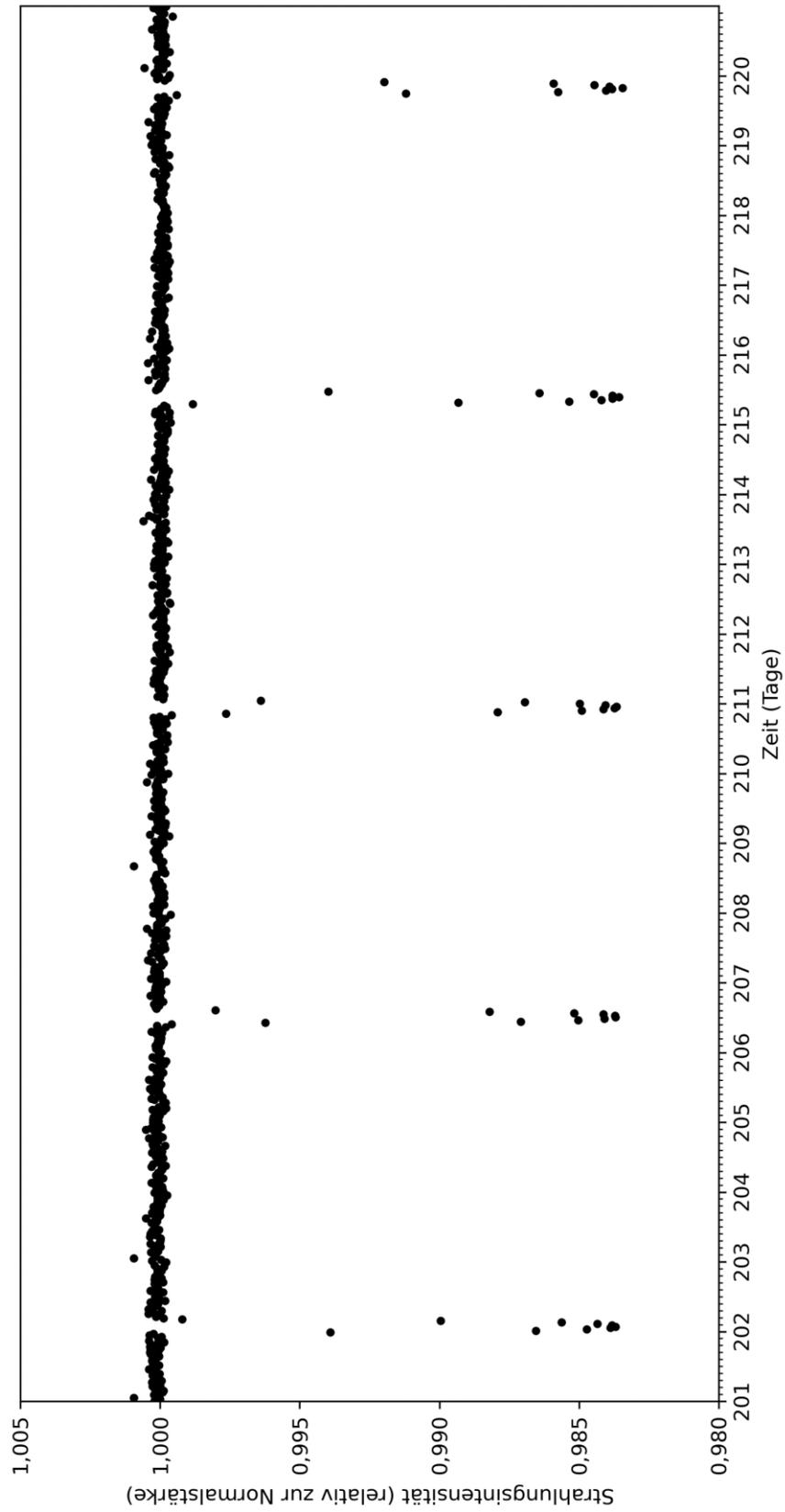


Abbildung 2.1: Lichtkurve des Sterns Kepler-12.

2.3.2 Quantitative Auswertung (Rechnerische Methode⁹)

Aufgabe (kann entfallen, falls Zeit gespart werden soll): Bestimme die Umlaufdauer des Planeten.

Die fünf Minima geben die Zeitpunkte an, an denen der Planet einen Teil des Sterns bedeckt. Die Zeiträume zwischen zwei Minima entsprechen daher der Umlaufdauer des Planeten.

Lies so gut du kannst die Zeitpunkte der fünf Minima ab und trage sie in die Tabelle ein.

Nummer des Minimums	Zeit (Tage)
1	
2	
3	
4	
5	

Betrachte das Minimum 1 als Startwert, den wir als Referenzzeit für die anderen Minima benutzen. Dessen Zeit setzen wir auf 0. Für die die Minima 2 bis 5 ziehen wir daher die Zeit des ersten Minimums ab und erhalten damit Dauer. Trage die Differenzen in der folgenden Tabelle (Spalte: Dauer) ein.

	Dauer (Tage)	Anzahl der Umläufe	Mittlere Dauer pro Umlauf (Tage)
Zeit 2 – Zeit 1			
Zeit 3 – Zeit 1			
Zeit 4 – Zeit 1			
Zeit 5 – Zeit 1			

Jede dieser Differenzen (Zeiträume) steht für eine andere Anzahl von Umläufen. Trage in der Tabelle (Spalte: Anzahl der Umläufe) ein, wie oft für jede Dauer der Planet den Stern umkreist hat. Um die mittlere Dauer pro Umlauf zu erhalten, teile in jeder Zeile die Dauer durch die Anzahl der Umläufe. Trage die resultierende mittlere Dauer pro Umlauf ebenfalls ein.

Berechne nun den Mittelwert (arithmetisches Mittel) der vier Werte, um eine gute Abschätzung für die Umlaufdauer des Planeten zu bekommen.

Zusatzaufgabe: Berechne die Standardabweichung für eine Abschätzung der Genauigkeit der ermittelten Umlaufdauer.

⁹ *Hinweis für die Lehrperson:* Eine verbesserte Methode zur Bestimmung der Umlaufperiode wäre z. B. die lineare Regression. Die Aufgabe könnte entsprechend angepasst werden. Aus Zeitgründen und weil dieser Aspekt nicht das Hauptziel dieser Ausarbeitung ist, reicht eine einfache rechnerische Methode völlig aus. Die intuitive Bestimmung über die Differenzen der benachbarten Minima ist nicht empfehlenswert, da sie schließlich nur die Minima 1 und 5 berücksichtigt.

2.4 Auswertung Phasenkurve

2.4.1 Zusammenhang zwischen Helligkeitsabnahme und Planet

Neben der Umlaufperiode des Planeten enthält die Lichtkurve noch weitere Informationen.

Aufgabe: Erläutere, warum sich die gemessene Helligkeit des Sterns periodisch ändert.

Aufgabe: Erkläre, welche Eigenschaften des Sterns und des Planeten zur Verringerung der Helligkeit führen.

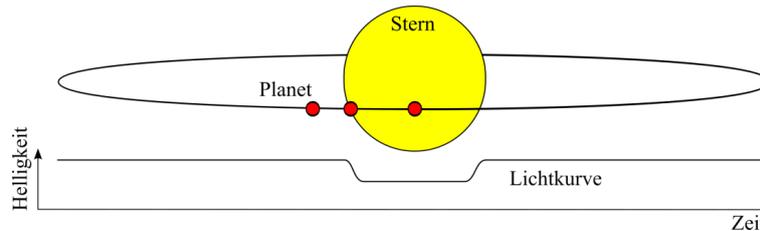


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Planetentransits. Wenn der Stern aus der Sicht des Beobachters die Sternscheibe kreuzt, sinkt die Helligkeit des Sterns. (Quelle: Planetary transit.svg: Nikola Smolenski derivative work (translation): Carbenium (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planetary_transit_de.svg), „Planetary transit de“, Lizenz: [CC BY-SA 3.0](#))

Der Zahlenwert der Abnahme der Helligkeit (Intensität) während einer Bedeckung durch den Planeten wird Transittiefe genannt. Sie ist eine dimensionslose Größe, die oft in Prozent (%) oder *parts per million* (ppm) angegeben und mit dem Formelzeichen ΔF bezeichnet wird. Weil die gemessene Intensität direkt davon abhängt, wie groß der Teil ist, der vom Stern verdeckt wird, gibt es einen einfachen Zusammenhang zwischen der Transittiefe und dem Verhältnis der Querschnittsflächen des Planeten (A_p) und des Sterns (A_*).

$$\Delta F = \frac{A_p}{A_*}$$

Nimmt man Kreisflächen an, so können in erster Näherung die Radien des Sterns und des Planeten eingeführt werden.

$$\Delta F = \frac{A_p}{A_*} = \frac{\pi \cdot R_p^2}{\pi \cdot R_*^2} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\Delta F} = \frac{R_p}{R_*}$$

Wenn die Transittiefe bekannt ist, kann man bei bekanntem Sternradius den Planetenradius berechnen. Leider sind die Lichtkurven für diese Auswertung nicht gut geeignet. Wenn du dir Abbildung 2.1 genauer ansiehst, erkennst du, dass der Helligkeitsverlauf der Minima nur wenige Datenpunkte enthält. Dadurch kann die Helligkeitsabnahme nur schlecht beziffert werden.

2.4.2 Radiusbestimmung mit Phasenkurve

Aufgabe: Erläutere, wie der Verlauf der Helligkeitsabnahme präziser nachverfolgt werden kann. Bedenke, dass der Planet den Stern während einer Messung viele Male bedeckt.

Da die Umlaufdauer gut bestimmt werden kann, können die Minima präzise überlagert werden. Weil die Bedeckungen typischerweise immer denselben Verlauf haben, decken die Datenpunkte im Allgemeinen jedes Mal einen anderen Abschnitt der Verfinsternung ab. Die Überlagerung der Verläufe rekonstruiert den Ablauf deswegen meistens gut.

Dabei geht zwar die Zeitinformation für die einzelnen Bedeckungen verloren. Für eine präzise Auswertung des sich wiederholenden Vorgangs der Bedeckung ist das jedoch unerheblich. Die grafische Darstellung wird Phasenkurve genannt. So wie der Mond uns während eines jeden Umlaufs zu gewissen Abständen dieselbe Phase zeigt, stellen alle Konstellationen während der Umrundung des Planeten um

[zurück zum Anfang](#)

den Stern ebenfalls Phasen dar. Statt der Zeit wird nun die Phase als Zahlenwert angegeben. Dabei ist die maximale Bedeckung, also der Zeitpunkt des Helligkeitsminimums, die Phase 0. Ein vollständiger Phasenumlauf hat den Wert 1. Meistens werden die Diagramme auf die Phase 0 zentriert, wobei der Phasenverlauf von -0,5 bis +0,5 reicht.

Abbildung 2.3 zeigt die Phasenkurve, die aus der Lichtkurve des Sterns Kepler-12 erstellt wurde. Die zeitliche Abdeckung des Verlaufs ist deutlich verbessert. Die Intensität ist in diesem Beispiel eine dimensionslose Größe, die das Verhältnis zur unverfinsterten Intensität des Sterns angibt.

Aufgabe: Bestimme aus der Phasenkurve in Abbildung 2.3 die Transittiefe ΔF . Ermittle dazu die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Strahlungsintensität der roten Kurve.

Der Stern Kepler-12 weist einen Radius von 1,483 Sonnenradien (R_{\odot}) auf.

Aufgabe: Berechne damit den Radius des Planeten Kepler-12 b und gib ihn in Jupiterradien (R_J) an. Nutze hierzu die folgenden Beziehungen:

$$\sqrt{\Delta F} = \frac{R_p}{R_*}$$

$$\frac{R_{\odot}}{R_J} = 9,7401$$

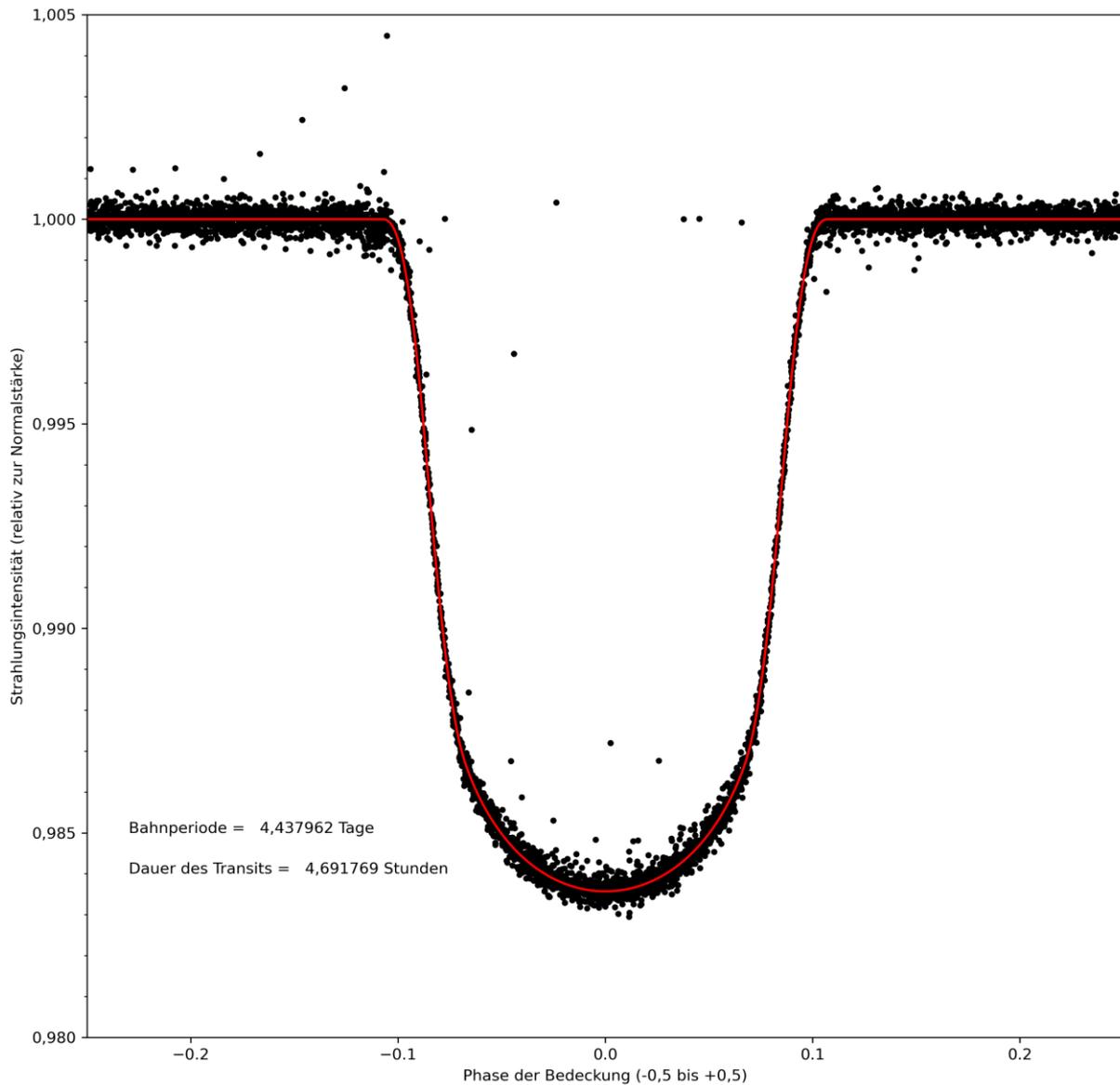


Abbildung 2.3: Phasenkurve des Sterns Kepler-12. Alle Helligkeitsminima der Messung sind zu einem repräsentativen Verlauf der Helligkeitsentwicklung überlagert. Der Verlauf ist dadurch mit Messpunkten so abgedeckt, dass er gut nachzuvollziehen ist. Hier ist nur der Ausschnitt der Phasenkurve um die Bedeckung dargestellt. Die rote Kurve entspricht dem mittleren Verlauf, um den die Datenpunkte statistisch streuen.

Aufgabe: Rekapituliere die bisherigen Aufgaben. Erläutere, wie man aus der Helligkeitsmessung eines Sterns die Größe eines ihn umkreisenden Planeten ermitteln kann.

2.5 Transitspektroskopie

2.5.1 Exkurs Spektrum

Die Transittiefe kann von der Farbe abhängen, in der wir den Stern beobachten. Wie du vielleicht weißt, kann man Licht in seine Farbanteile aufspalten. Das Licht eines Sterns ist dabei ähnlich wie das Licht einer Glühbirne zusammengesetzt. Der Farbverteilung werden in der Physik Messgrößen zugeordnet, die das Licht als eine Welle betrachten. Je röter das Licht ist, desto größer ist die zugeordnete Wellenlänge (siehe Abbildung 2.4). Die Analogie mit Klängen hilft vielleicht beim Verständnis. Hohe Töne haben eine kleine akustische Wellenlänge, tiefe Töne eine große Wellenlänge. Beim Licht entsprechen die Farben den Tonhöhen.

Neben dem sichtbaren Licht gibt es Lichtformen, die das menschliche Auge nicht sehen kann, wie z. B. Röntgenstrahlung, ultraviolettes Licht und Infrarotlicht.

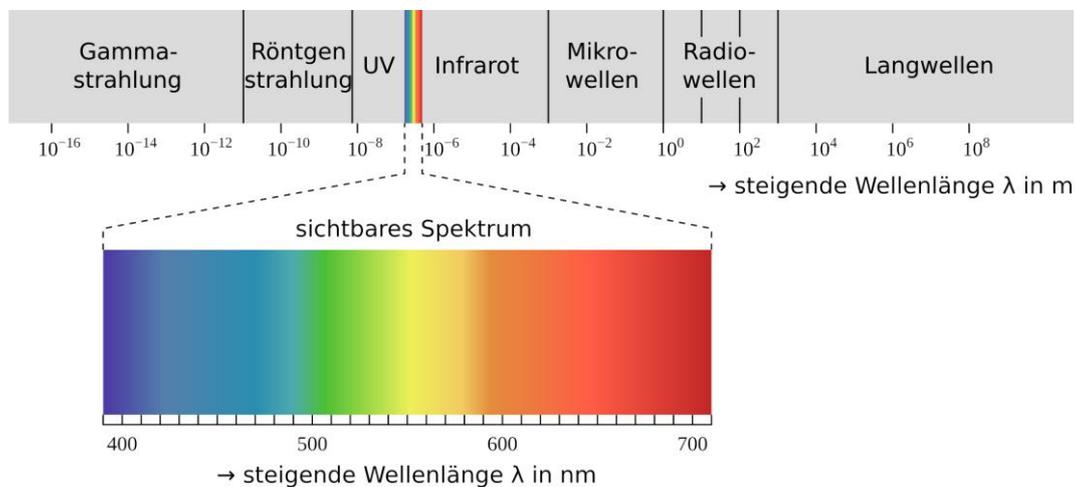


Abbildung 2.4: Aufspaltung des Lichts in die Farbanteile. Sichtbares Licht interpretieren unser Auge und Gehirn als Farben von Violett über Grün zu Rot. In der Physik werden dieser Abfolge von Farben Wellenlängen zugeordnet, die umso größer sind, je röter das Licht ist. Sichtbares Licht besitzt Wellenlängen von einigen Hundert Nanometern (Milliardenstel Meter). (Quelle: Matt (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg>), „EM-Spektrum“, Lizenz: [CC BY-SA 2.5](#))

2.5.2 Einfluss der Planetenatmosphäre

Bisher haben wir hauptsächlich die undurchsichtigen Planetenkörper betrachtet, die die leuchtende Sternoberfläche verdecken können und somit eine kleine Abnahme der beobachteten Helligkeit erzeugen. Daraus konnten wir die Größe eines Planeten ermitteln.

Aber auch Atmosphären (Gase, Wolken) können einen Einfluss haben. Die Gase, wie die in der Erdatmosphäre, sind oft Moleküle (Stickstoff: N_2 , Sauerstoff: O_2 , Kohlendioxid: CO_2 , Wasser (Dampf): H_2O). In vielen Exoplaneten liegen sie aber auch als Atome (Wasserstoff: H , Helium: He) vor, insbesondere bei hohen Temperaturen.

Die Gase in den Atmosphären sind für weite Teile des Lichts durchsichtig, absorbieren (verschlucken) jedoch Licht bei spezifischen Farben (Wellenlängen), die dann in dem auf der Erde empfangenen Licht fehlen. Beobachtet man daher den Transit in diesen Farbbereichen, erscheinen die Transittiefen größer als in anderen. Trägt man die Transittiefen abhängig von der Wellenlänge auf, erhält man eine Darstellung (Spektrum), die uns verrät, wie die Atmosphäre zusammengesetzt ist.

2.5.3 Demonstrationsversuch

In einem Demonstrationsversuch wurde die Beobachtung eines Planetentransits simuliert. Eine Lampe erzeugt auf einem halbdurchlässigen Schirm einen runden Lichtfleck, der als leuchtende Sternscheibe interpretiert werden kann. Im Weißlicht bedeckt der lichtundurchlässige Planetenkörper einen kleinen Teil dieser leuchtenden Scheibe und erzeugt eine kleine Abnahme der Gesamthelligkeit (Abbildung 2.5). Hier sei noch einmal wiederholt: Dieser Vorgang kann über die große Entfernung zu anderen Sternen und Exoplaneten nicht direkt beobachtet werden. Er wird lediglich durch die Helligkeitsabnahme des Sterns wahrgenommen. Im Versuchsaufbau wird die Scheibe des Planeten durch eine ringförmige Halterung fixiert. Diese muss natürlich für den Vergleich mit der realen Situation vernachlässigt werden.

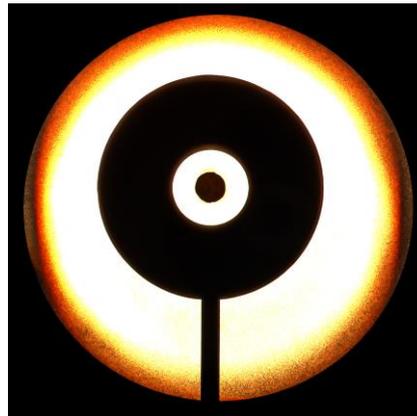


Abbildung 2.5: Demonstrationsversuch zur Bedeckung eines Sterns durch einen vorbeiziehenden Planeten. Der dunkle Kreis in der Mitte bedeckt den Lichtfleck im Hintergrund, wie ein Planet einen Stern teilweise verfinstern würde. Dieser Vorgang kann während eines tatsächlichen Planetentransits nicht beobachtet werden. Er wird nur indirekt durch die Abnahme der Sternhelligkeit wahrgenommen. Die ringförmige Halterung um die zentrale Scheibe muss vernachlässigt werden. Die „Atmosphäre“ zwischen der Halterung und dem „Planet“ ist hier transparent. (Bild: M. Nielbock, Lizenz: [CC BY 4.0](#))

Nehmen wir an, dass sich um den Planeten eine Atmosphäre befindet, die das Licht in einigen Farben absorbiert. Sie befindet sich im Versuch zwischen dem „Planet“ und der Halterung. Der Effekt sei so klein, dass er im Weißlicht nicht zu sehen ist.

Wählt man jedoch für die Kamera einen Farbfilter, der jener Farbe entspricht, die die Atmosphäre dem Licht des Sterns entnimmt, erkennt man eine Verdunklung im Bereich um den Planeten. Im Demonstrationsversuch simuliert ein Rotfilter den Einfluss der Atmosphäre, der dem Licht den blauen Anteil entnimmt und befindet sich auch hier zwischen dem „Planet“ und der Halterung (Abbildung 2.6).

Die Beobachtung mit der Kamera erfolgt mit drei optischen Filtern in den Farben Rot, Grün und Blau. Dadurch erscheint der Bereich um die zentrale Scheibe je nach verwendetem Farbfilter entweder transparent oder unterschiedlich stark verdunkelt. Am stärksten ist der Effekt mit dem blauen Filter, weil die „Atmosphäre“ diesen Lichtanteil herausfiltert.

Diese zusätzliche Abnahme der Helligkeit ist im realen Vorgang mit einem Exoplaneten messbar und weist eine Atmosphäre nach. Je nach Verdunklungsgrad bei den verwendeten Farbfiltern kann ermittelt werden, welche Farbe in der Atmosphäre absorbiert wird. Das verrät uns ihre Zusammensetzung.



Abbildung 2.6: Demonstrationsversuch zur Bedeckung eines Sterns durch einen vorbeiziehenden Planeten mit einer Atmosphäre. Der dunkle Kreis in der Mitte bedeckt den Lichtfleck im Hintergrund, wie ein Planetenkörper einen Stern teilweise verfinstern würde. Die Atmosphäre wurde mit einem roten Farbfilter realisiert, der den blauen Anteil des Lichts blockiert und sich zwischen dem „Planet“ und der Halterung befindet. Die Atmosphäre erscheint bei der Beobachtung mit verschiedenen Farbfiltern unterschiedlich stark verdunkelt. Dadurch erscheint die Atmosphäre im linken Fall transparent, weil die Kamera die Anordnung mit einem Rotfilter beobachtet. Mit anderen Filtern erscheint der Bereich unterschiedlich stark abgeschwächt. Dieser Vorgang kann während eines tatsächlichen Planetentransits nicht beobachtet werden. Er wird nur indirekt durch die Abnahme der Sternhelligkeit wahrgenommen. Die ringförmige Halterung um die zentrale Scheibe muss vernachlässigt werden. (Bild: M. Nielbock, Lizenz: [CC BY 4.0](#))

2.5.4 Transitspektrum

Stelle dir nun vor, du hast während vieler Planetentransits Lichtkurven und dann Phasenkurven bei verschiedenen Farben (Wellenlängen) aufgenommen.

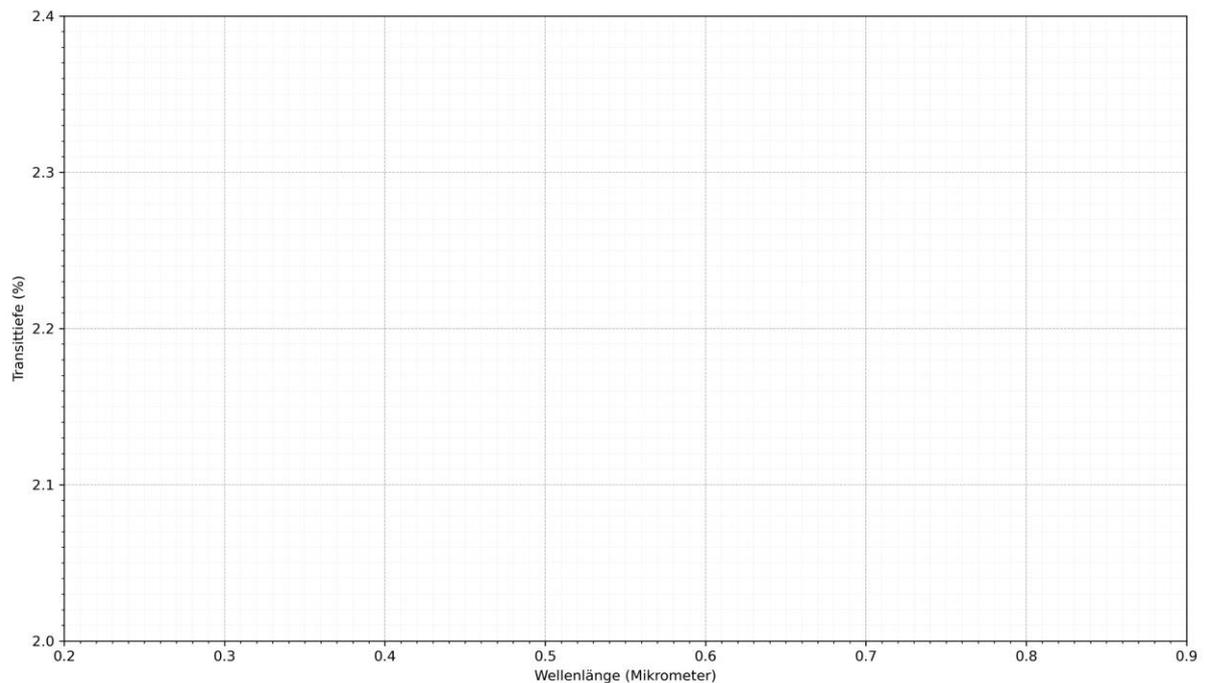
Wellenlänge (Mikrometer)	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Transittiefe (%)	2,05	2,03	2,06	2,09	2,05	2,11	2,35	2,12	2,03	2,08	2,05

Aufgabe: Erstelle aus der Wertetabelle ein Transitspektrum. Trage dafür die Wertepaare in das Koordinatensystem auf der nächsten Seite ein.

Aufgabe: Beschreibe das Ergebnis. Gibt es einen auffälligen Wert?

In diesem Beispiel ist die Transittiefe bei einer Farbe (Wellenlänge) besonders groß. Dort absorbiert die Atmosphäre das Licht mehr als anderswo. Die Wellenlänge ist charakteristisch für ein chemisches Element, Natrium. Das findet man üblicherweise auf heißen Planeten, wo Metalle wie Natrium verdampfen und als Gas vorkommen. Auf der Erde nutzen wir Natriumdampf für Lampen¹⁰, die ein gelb-oranges Licht abgeben.

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Natriumdampflampe>



2.5.5 Realistisches Beispiel einer Planetenatmosphäre: WASP-39 b

Schau dir Abbildung 2.7 auf der nächsten Seite an. Es zeigt ein aktuelles Transitspektrum des Exoplaneten WASP-39 b, das mit dem Weltraumteleskop James Webb aufgenommen wurde. Die Farben zeigen drei verschiedene Beobachtungen an, die sich gegenseitig vervollständigen.

Das sichtbare Licht reicht bis etwa 0,8 Mikrometer. Größere Wellenlängen stellen Infrarotlicht dar, das das menschliche Auge nicht erkennen kann.

Aufgabe: Beschreibe und erkläre das Diagramm. Erinnerung dich an den Begriff der Transittiefe und erkläre, was die Bereiche mit größeren Transittiefen darstellen.

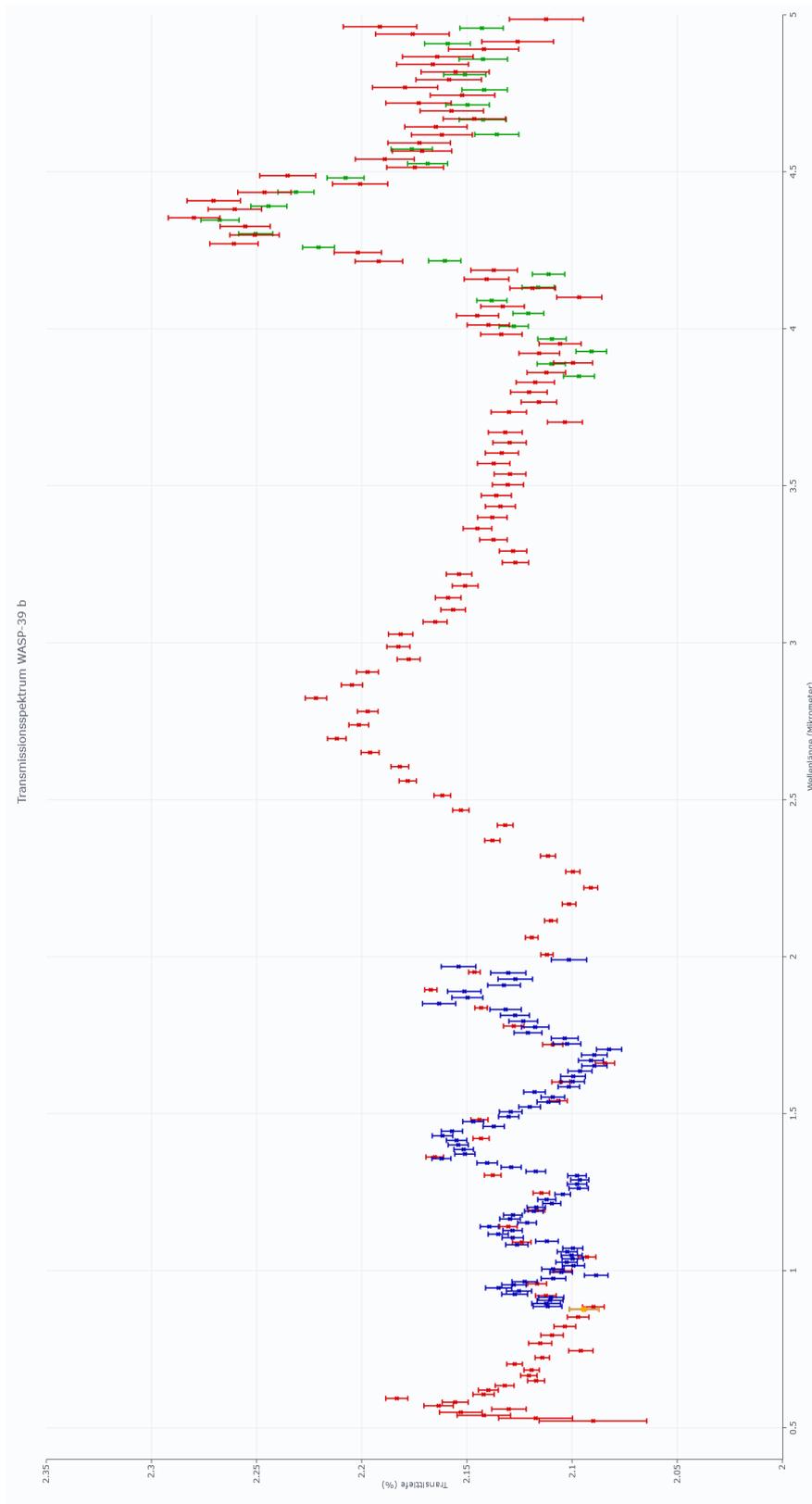


Abbildung 2.7: Echtes Transitspektrum des Exoplaneten WASP-39 b, zusammengestellt aus drei Messungen mit dem Weltraumteleskop James Webb [16]. Die Farben geben die drei Datensätze an.

Aufgabe: Die untere Tabelle ordnet verschiedenen Gasen Wellenlängen zu, bei denen sie besonders stark Strahlung absorbieren. Identifiziere daraus diejenigen, die im Spektrum den hohen Transittiefen entsprechen.

Name	Chemische Formel	Wellenlänge (Mikrometer)
Natrium (Dampf)	Na	0,59
Wasser (Dampf)	H ₂ O	0,95 1,15 1,40 1,90 2,75
Magnesium (Dampf)	Mg	1,00
Sauerstoff	O ₂	1,27
Kohlendioxid	CO ₂	1,60 4,35
Wasserstoff	H ₂	2,50
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	2,65
Ammoniak	NH ₃	3,00
Methan	CH ₄	3,37
Schwefeldioxid	SO ₂	4,05

Aufgabe: Erläutere am Spektrum, welche Gase in der Atmosphäre von WASP-39 b vorkommen.

Aufgabe: Rekapituliere die bisherigen Aufgaben. Erläutere, wie man aus der Helligkeitsmessung eines Sterns Gase in der Atmosphäre eines Planeten ermitteln kann, der den Stern umkreist.

3 Lösungsbeispiele

2.2 Fragen, Antworten und Diskussion

Frage: Wie nennt man Planeten, die andere Sterne als die Sonne umkreisen?

Antwort: Extrasolare Planeten oder Exoplaneten

Frage: Woraus bestehen Planeten, z. B. die im Sonnensystem?

Antwort: Gestein, Gas, Eis, Flüssigkeit (z. B. Wasser)

Frage: Was passiert mit dem Licht eines Sterns, wenn von uns aus gesehen ein Planet an ihm vorbei zieht?

Antwort: Das Licht wird schwächer.

Frage: Woran kann es liegen, wenn die gemessene Helligkeit eines Sterns regelmäßig sinkt?

Antwort: Ein Planet könnte den Stern umkreisen. Allerdings sind auch Sternflecken denkbar.

2.3.1 Qualitative Auswertung

Aufgabe: Beschreibe das Diagramm in Abbildung 2.1 und erläutere den zeitlichen Verlauf der Messung.
Antwort: Das Diagramm zeigt Daten einer Messung von Tag 201 bis Tag 221. Man sieht, wie die Intensität des Sterns Kepler-12 während dieses Zeitraums verläuft. Während dieser Zeit sinkt die Helligkeit fünfmal ab. Der Abstand der Helligkeitsabfälle scheint regelmäßig zu sein. Die Intensität des Sterns wird relativ zu seiner Normalhelligkeit aufgetragen.

Frage: Die sich wiederholenden Minima in der Sternhelligkeit werden durch einen Planeten (Name: Kepler-12 b) hervorgerufen, der den Stern umkreist und die Sternoberfläche regelmäßig bedeckt. Wie oft ist der Planet im angegebenen Zeitfenster um Stern herumgelaufen?

Antwort: fünfmal

Aufgabe: Erkläre, wie du die Umlaufdauer des Planeten bestimmen kannst.

Antwort: Die Umlaufdauer entspricht der Periode, mit der die Helligkeit des Sterns abnimmt. Da die zeitlichen Abstände zwischen den Minima gleich sein sollten, entspricht die Umlaufdauer dem mittleren zeitlichen Abstand. Deswegen muss der Mittelwert der zeitlichen Abstände ermittelt werden.

2.3.2 Quantitative Auswertung (Rechnerische Methode)

Ergebnis: Umlaufdauer: 4,433 Tage (weniger als 1 % Abweichung vom Originalwert: 4,437962 Tage); Standardabweichung: 0,009 Tage; die Zahlenwerte können jedoch leicht unter den SuS variieren.

2.4.1 Zusammenhang zwischen Helligkeitsabnahme und Planet

Aufgabe: Erläutere, warum sich die gemessene Helligkeit des Sterns periodisch ändert.

Antwort: Ein Planet umkreist den Stern so, dass er von uns aus gesehen den Stern kreuzt. Dabei verdunkelt der Planet den Stern leicht.

Aufgabe: Erkläre, welche Eigenschaften des Sterns und des Planeten zur Verringerung der Helligkeit führen.

Antwort: Hauptsächlich undurchsichtige Anteile des Planeten führen zur Verringerung der Helligkeit.

2.4.2 Radiusbestimmung mit Phasenkurve

Aufgabe: Erläutere, wie der Verlauf der Helligkeitsabnahme präziser nachverfolgt werden kann. Bedenke, dass der Planet den Stern während einer Messung viele Male bedeckt.

Antwort: Der Stern wird bei jedem Umlauf vom Planeten bedeckt. Überlagert man alle Verläufe der Bedeckung, erhält man einen Verlauf, der jedoch eine bessere zeitliche Abdeckung hat.

Aufgabe: Bestimme aus der Phasenkurve in Abbildung 2.3 die Transittiefe ΔF . Ermittle dazu die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Strahlungsintensität der roten Kurve.

Antwort: Die Transittiefe beträgt 0,0164 oder 1,64 %.

Aufgabe: Berechne damit den Radius des Planeten Kepler-12 b und gib ihn in Jupiterradien (R_J) an.

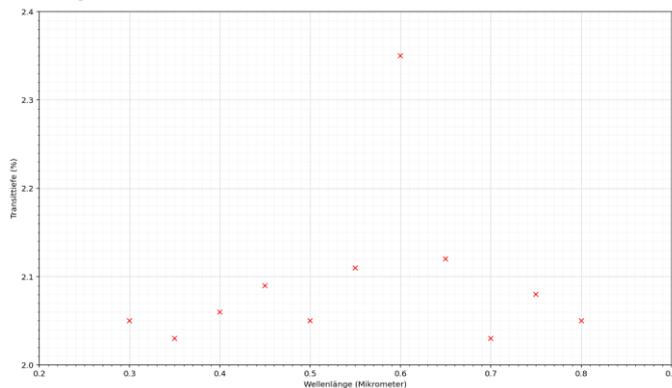
Antwort: Kepler-12 b hat einen Radius von 1,85 Jupiterradien¹¹.

Aufgabe: Rekapituliere die bisherigen Aufgaben. Erläutere, wie man aus der Helligkeitsmessung eines Sterns die Größe eines ihn umkreisenden Planeten ermitteln kann.

Voraussetzung: Die Bahn eines zu vermessenden Exoplaneten um den Zentralstern ist gerade so geneigt, dass sie von uns aus gesehen den Stern kreuzt. Der Planet verdeckt periodisch einen Teil der Sternoberfläche und verursacht damit eine Verringerung der Sternhelligkeit. In erster Näherung ist die Reduktion der empfangenen Intensität vom Verhältnis der Querschnittsflächen des Planeten und des Sterns abhängig. Nimmt man an, dass die Querschnittsfläche Kreise sind, kann mit der Kenntnis des Sternradius der Planetenradius berechnet werden.

2.5.4 Transitspektrum

Aufgabe: Erstelle aus der Wertetabelle ein Transitspektrum. Trage dafür die Wertepaare in das Koordinatensystem auf der nächsten Seite ein.



Aufgabe: Beschreibe das Ergebnis. Gibt es einen auffälligen Wert?

Antwort: Die Transittiefe ist bei einer Wellenlänge von 0,6 Mikrometern besonders groß.

2.5.5 Realistisches Beispiel einer Planetenatmosphäre: WASP-39 b

Aufgabe: Beschreibe und erläutere das Diagramm. Erinnerung dich an den Begriff der Transittiefe und erläutere, was die Bereiche mit größeren Transittiefen darstellen.

Antwort: Das Diagramm gibt Transittiefen und damit Beobachtung von Sternbedeckungen durch einen Planeten vielen Wellenlängen zwischen 0,5 und 5 Mikrometern an. Bei höheren größeren Transittiefen absorbiert die Atmosphäre des Planeten einen Teil des Sternlichts. Damit ist eine Atmosphäre nachgewiesen. Verschiedene Bestandteile können dadurch identifiziert werden.

¹¹ Der Literaturwert ist geringfügig geringer.

[zurück zum Anfang](#)

Aufgabe: Die untere Tabelle ordnet verschiedenen Gasen Wellenlängen zu, bei denen sie besonders stark Strahlung absorbieren. Identifiziere daraus diejenigen, die im Spektrum den hohen Transittiefen entsprechen.

Antwort: Siehe Abbildung 1.6

Aufgabe: Erläutere am Spektrum, welche Gase in der Atmosphäre von WASP-39 b vorkommen.

Antwort: Natrium, Wasser, Methan, Kohlendioxid, Schwefeldioxid

Aufgabe: Rekapituliere die bisherigen Aufgaben. Erläutere, wie man aus der Helligkeitsmessung eines Sterns Gase in der Atmosphäre eines Planeten ermitteln kann, der den Stern umkreist.

Voraussetzung: Die Bahn eines zu vermessenden Exoplaneten um den Zentralstern ist gerade so geneigt, dass sie von uns aus gesehen den Stern kreuzt. Der Planet verdeckt periodisch einen Teil der Sternoberfläche und verursacht damit eine Verringerung der Sternhelligkeit. In erster Näherung ist die Reduktion der empfangenen Intensität vom Verhältnis der Querschnittsflächen des Planeten und des Sterns abhängig. Nimmt man an, dass die Querschnittsfläche Kreise sind, kann mit der Kenntnis des Sternradius der Planetenradius berechnet werden. Abhängig von der beobachteten Wellenlänge können die Transittiefen verschieden stark ausfallen. Trägt man sie gegen die Wellenlänge auf, erhält man ein Spektrum. An den Maxima absorbieren Gase spezifische Lichtanteile aus dem Sternlicht. Damit können die Gase identifiziert werden.

4 Anhang

Die Berechnung der Umlaufperiode in Abschnitt 2.3.2 kann nicht dadurch erfolgen, dass man zunächst die zeitlichen Abstände zwischen benachbarten Minima berechnet und dann daraus den Mittelwert bildet. Die Berechnung würde letztendlich nur die Datenpunkte 1 und 5 berücksichtigen.

$$\overline{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta t_i}{4} = \frac{\Delta t_i = t_{i+1} - t_i}{4} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) + (t_4 - t_3) + (t_5 - t_4)}{4} = \frac{t_5 - t_1}{4}$$

5 Literaturverzeichnis

- [1] A. Wolszczan und D. A. Frail, „A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12“, *Nature*, Bd. 355, Nr. 6356, S. 145–147, Jan. 1992, doi: 10.1038/355145a0.
- [2] M. Mayor u. a., „51 Pegasi“, in *International Astronomical Union Circular*, Okt. 1995, S. 1. Zugegriffen: 23. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995I-AUC.6251....1M>
- [3] NASA Exoplanet Science Institute, „Planetary Systems Table“, 2020, *IPAC*. doi: 10.26133/NEA12.
- [4] D. Brockmann-Behnsen, „Auf der Jagd nach Exoplaneten – Anwendung der Transitmethode mit Originaldaten des Spitzer-Weltraumteleskops“, *WIS - Wissenschaft in die Schulen*, Nr. 12/2022, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/alias/material/auf-der-jagd-nach-exoplaneten-anwendung-der-transitmethode-mit-originaldaten-des-spitzer-weltraumtel/1571204>
- [5] G. Herms, „Die Suche nach erdähnlichen Exoplaneten – wie geht das?“, Nr. 03/2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/alias/material/die-suche-nach-erdaehnlichen-exoplaneten-wie-geht-das/1421035>
- [6] O. Hofschulz, „Wie findet man erdähnliche Exoplaneten?“, *WIS - Wissenschaft in die Schulen*, Nr. 02/2014, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/alias/material/wie-findet-man-erdaehnliche-exoplaneten/1156166>
- [7] K. Supp, „Im Spektrum - Stationenarbeit zur Radialgeschwindigkeitsmethode“, *WIS - Wissenschaft in die Schulen*, Nr. 10/2023, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/alias/material/im-spektrum-stationenarbeit-zur-radialgeschwindigkeitsmethode/1571224>
- [8] M. Nielbock, „Woraus bestehen Exoplaneten?“, *WIS - Wissenschaft in die Schulen*, Nr. 1/2024, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/alias/material/woraus-bestehen-exoplaneten/1571232>
- [9] W. Borucki u. a., „Finding Earth-size planets in the habitable zone: the *Kepler Mission*“, *Proc. Int. Astron. Union*, Bd. 3, Nr. S249, S. 17–24, 2008, doi: 10.1017/S174392130801630X.
- [10] D. G. Koch u. a., „*KEPLER MISSION DESIGN, REALIZED PHOTOMETRIC PERFORMANCE, AND EARLY SCIENCE*“, *Astrophys. J.*, Bd. 713, Nr. 2, S. L79–L86, Apr. 2010, doi: 10.1088/2041-8205/713/2/L79.

[zurück zum Anfang](#)

- [11] Z. Rustamkulov *u. a.*, „Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM“, *Nature*, Bd. 614, Nr. 7949, S. 659–663, Feb. 2023, doi: 10.1038/s41586-022-05677-y.
- [12] N. Nikolov *u. a.*, „VLT FORS2 COMPARATIVE TRANSMISSION SPECTROSCOPY: DETECTION OF Na IN THE ATMOSPHERE OF WASP-39b FROM THE GROUND“, *Astrophys. J.*, Bd. 832, Nr. 2, S. 191, Dez. 2016, doi: 10.3847/0004-637X/832/2/191.
- [13] C. Pulliam, „NASA’s Webb Reveals an Exoplanet Atmosphere as Never Seen Before“, Webb Space Telescope. Zugegriffen: 19. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-060>
- [14] M. Nielbock, „Webb-Teleskop weist Kohlendioxid in der Atmosphäre eines Exoplaneten nach“, Max-Planck-Institut für Astronomie. Zugegriffen: 19. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2022-14-jwst-wasp39b>
- [15] M. Pössel, „Meilenstein für Weltraumteleskop JWST: bessere Exoplaneten-Atmosphären-Beobachtungen als je zuvor“, Max-Planck-Institut für Astronomie. Zugegriffen: 19. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2022-17-wasp39b-update>
- [16] A. L. Carter *u. a.*, „A benchmark JWST near-infrared spectrum for the exoplanet WASP-39 b“, *Nat. Astron.*, Bd. 8, Nr. 8, S. 1008–1019, Juli 2024, doi: 10.1038/s41550-024-02292-x.

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse www.wissenschaft-schulen.de (Fachgebiet Astronomie).

Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors (nielbock@hda-hd.de) senden könnten.