



Exoplaneten in Mehrfachsternsystemen

Leonard Jansen

Seminarfach Astronomie

Herr Riemer

Schuljahr 24/25

Inhalt

1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Exoplanet Forschung.....	2
2.1 Entdeckung und Nachweismethoden.....	3
2.2 Eigenschaften von Exoplaneten.....	4
2.3 Unterschiede zwischen Einzelstern- und Mehrfachsternsystemen.....	6
3 Mehrfachsternsysteme und ihre Dynamik.....	7
3.1 Arten von Mehrfachsternsystemen.....	7
3.2 Stabilität und typische Umlaufbahnen von Exoplaneten.....	8
3.3 Einfluss der Sternanzahl auf die Planetenentstehung.....	10
4 Exoplaneten in Mehrfachsternsystemen.....	12
4.1 Bekannte Beispiele und ihre Besonderheiten.....	12
5 Methoden und Herausforderungen der Erforschung.....	13
5.1 Geplante Missionen und Zukunftsaussichten.....	13
6 Zusammenfassung und Ausblick (Fazit).....	14
7 Anhang mit Quellen.....	15

1 Einleitung

Seit der Entdeckung des ersten Exoplaneten im Jahr 1995 hat sich die Forschung rund um diese planetaren Objekte stets weiterentwickelt. Der bisherige Stand führt zu der Frage, ob Planeten, die um zwei oder mehr Sterne kreisen, ebenfalls lebensfreundliche Bedingungen bieten können. Mittlerweile sind tausende von Exoplaneten mit unterschiedlichsten individuellen Gegebenheiten bekannt, und Wissenschaftler stehen vor der grundlegenden Frage, wie einzigartig unser Sonnensystem tatsächlich ist. Der Begriff „Exoplanet“ beschreibt Planeten, die nicht um unsere Sonne, sondern um andere Sterne kreisen. Dabei gibt es keine direkte Differenzierung in ihren Gegebenheiten, sondern eine Verallgemeinerung aller möglichen Planetenformen, wie Gasriesen, Gesteinsplaneten oder sogar erdähnliche Planeten, die theoretisch lebensfreundliche Bedingungen aufweisen könnten. Ein sich abgrenzendes Forschungsfeld sind Exoplaneten in Mehrfachsternsystemen. Darunter sind zwei oder mehr Sterne zu verstehen, die in einem System ein Gravitationszentrum umkreisen. Diese Systeme machen einen großen Anteil aller uns bekannten Sterne innerhalb unserer Galaxie, der Milchstraße, aus. Und dennoch ist uns wenig über ihr Potenzial zur Planetenentstehung und zu genauen Abläufen dieser Entstehungen bekannt. Da das Gebiet der Erforschung von Exoplaneten deutlich zu umfassend ist, um es in dieser Facharbeit vollständig zu präsentieren, werde ich auf folgende vier Themen eingehen, um Einblick in das Thema zu gewähren. Dafür werde ich zuerst auf die Grundlagen der Erforschung von Exoplaneten eingehen, die essenziell für das Verständnis des Themas sind. Daraufhin blicke ich auf die Mehrfachsysteme und speziell auf ihre Dynamik, und darauffolgend auf die Exoplaneten in diesen Systemen, um den Kern meiner Arbeit zu determinieren. Abschließend gehe ich gezielt auf die Herausforderungen der Erforschung ein, und gebe zum Schluss noch einen Ausblick.

Da das Thema Exoplaneten in Mehrfachsternsystemen auf astronomische Beobachtungen und komplexen mathematischen Modellen basiert, ist ein Schülerversuch nur schwer umzusetzen, was dazu führt, dass sich meine Arbeit

nur aus wissenschaftlichen Informationen aus eigener Recherche zusammensetzt.

2. Grundlagen der Exoplaneten Forschung

Die Erforschung von Exoplaneten entwickelte sich über die letzten Jahrzehnte zu einem der am besten fundierten Forschungsgebiete in der Astronomie. Der Begriff Exoplanet beschreibt dabei alle planetaren Objekte außerhalb unseres Sonnensystems, also alle Planeten die um einen anderen Stern als unsere Sonne kreisen. Durch die Entdeckung des ersten Exoplaneten Ende des 20. Jahrhunderts ist die Wissenschaft in der Lage, immer mehr ihrer Eigenschaften und Gegebenheiten zu identifizieren und zu untersuchen. Dabei stoßen Wissenschaftler immer wieder auf Überraschungen und lernen so dauerhaft neues über Exoplaneten. In diesem Kapitel werde ich die Grundlagen der Exoplaneten-Forschung vorstellen, darunter die Methoden zur Entdeckung und zum Nachweis von Exoplaneten, die wichtigsten Eigenschaften dieser Himmelskörper sowie die Unterschiede zwischen Einzelstern- und Mehrfachsternsystemen. Die allgemeine Erforschung von Exoplaneten und ihren Bedingungen ist eng mit der Suche nach möglichen extraterrestrischen Lebensformen verbunden. Wissenschaftler legen dabei besonderen Wert auf Informationen über Exoplaneten in der Habitablen Zone, ein Bereich um einen Stern, in dem die Existenz von flüssigem Wasser möglich ist. Da die Wissenschaft Wasser als essenzielle Voraussetzung für kohlenstoffbasiertes Leben bzw. Zelluläres Leben definiert, ist die Habitable Zone der beste Anhaltspunkt und bietet die höchsten Chancen auf fremdes Leben.¹ Exoplaneten lassen sich zudem kategorisieren und besitzen somit eigene Eigenschaften und Klassifikationen. Unterschieden wird dabei vor allem die Substanz aus denen die Planeten bestehen. Gasriesen wie der Jupiter machen einen großen Anteil bekannter Exoplaneten aus. Auch Supererden, die eine Masse von ungefähr unserer Erde, bis Neptun haben, und sowohl Gasförmig als auch aus Gestein bestehen können, machen einen Anteil aus. Um Exoplaneten zu entdecken, definiert die

¹ Science.nasa.gov: The habitable Zone. URL: <https://science.nasa.gov/exoplanets/habitable-zone/>

Wissenschaft ein paar indirekte Methoden, da die Planeten oft deutlich lichtschwächer als ihr/e Zentralstern/e sind. Das führt dazu, dass eine direkte Beobachtung der Planeten, bis auf wenige Ausnahmen, fast unmöglich ist.

2.1 Entdeckung und Nachweismethoden

Da Exoplaneten nur einen Bruchteil des Lichts ihres Zentralsterns reflektieren, ist es extrem schwierig sie direkt zu beobachten. Um Exoplaneten dennoch zu identifizieren, entwickelten Forscher indirekte Methoden. Da es trotz der Schwierigkeit der direkten Beobachtung, direkte Nachweismethoden gibt, werde ich beide Methoden differenziert voneinander untersuchen und erklären. Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode, der ersten indirekten Methode, messen Forscher die minimalen Bewegungen des Sterns, die durch die Gravitation eines vermuteten Exoplaneten verursacht wird. Aufgrund des Doppler-Effekts führt diese Bewegung zu einer periodischen Verschiebung der Spektrallinie des Sterns. Der Planet und sein Zentralstern kreisen dabei um einen gemeinsamen Masseschwerpunkt. Der liegt nicht zwingend in der Mitte des Zentralsterns, sondern meist nur in der Nähe. Auch in unserem Sonnensystem hängt die Position des sog. Baryzentrum vor allem von den Gasriesen Jupiter und Saturn ab.² Bei der Radialgeschwindigkeitsmethode führt der Zentralstern eine periodische Bewegung, die eine messbare Veränderung der Radialgeschwindigkeit hat, aus. Diese Bewegung entlang der Sichtlinie zur Erde verursacht eine Rotverschiebung, wenn sich der Stern entfernt und eine Blauverschiebung, wenn er sich nähert. Je nach Stärke der Bewegung bzw. der Verschiebung des Lichtspektrums des Sterns können Forscher Rückschlüsse auf die Größe bzw. Masse des vermuteten

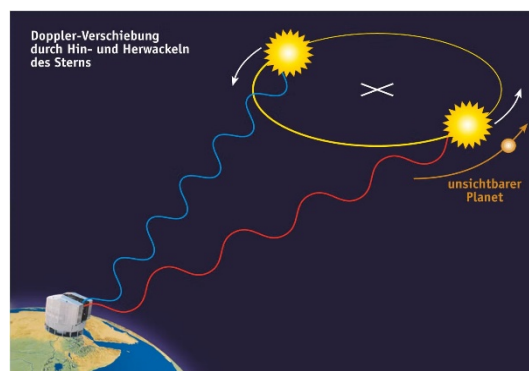


Abbildung 1
Radialgeschwindigkeitsmethode

² Wikipedia.org: Baryzentrum. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Baryzentrum>

Planeten schließen.³ Mit dieser Methode wurde unter anderem auch der erste Exoplanet, 51 Pegasi b, im Jahr 1995 von Michel Mayor und Didier Queloz entdeckt. Das Doppler-Verfahren hat sich seither als das meistgenutzte Verfahren zur Entdeckung von Exoplaneten durchgesetzt. Mit diesem Verfahren „kann man die Geschwindigkeit eines Sterns mit einer Genauigkeit eines Meters pro Sekunde messen – der Geschwindigkeit eines Fußgängers.“⁴ Als zweite Methode der indirekten Nachweismethoden erkläre ich die Transitmethode. Die Transitmethode basiert auf dem periodischen Vorbeiziehen des Exoplaneten auf seiner Umlaufbahn vor dem Stern und die damit einhergehende minimale Veränderung der Helligkeit des Zentralsterns. Die Abnahme der Helligkeit kann durch ultrapräzise Teleskope gemessen werden, und so Aufschlussreiche Informationen über Größe, Umlaufperiode und Atmosphäre liefern. Bekannt sind die Missionen Kepler und TESS, die durch diese Methode Tausende Exoplaneten entdecken konnten.⁵ Die Astrometrie ist eine weitere Methode, um minimale Positionsänderung von potenziellen Zentralsternen zu erkennen und zu messen. Da die Messung präzise sein muss, konnten Wissenschaftler mit dieser Methode erst wenige Planeten entdecken.⁶ Aufgrund moderner Teleskope gewinnt die Methode allerdings an Bedeutung. Die indirekten Methoden der Planetensuche haben eine wissenschaftliche Revolution in der Planetenforschung ausgelöst, da sie bewiesen haben, dass unser Sonnensystem nur eins von unfassbar vielen ist. Indirekte Methoden geben Forschern Informationen über die Bahneigenschaften von Exoplaneten und manchmal auch über deren Masse oder Radien. Um direkte Beschaffenheiten der Exoplaneten zu analysieren und zu erforschen, ist eine direkte Beobachtung der Planeten erforderlich. Bilder können nur extrem selten direkt gemacht werden, da die Helligkeit der Zentralsterne eine Fotografie fast unmöglich macht. Dennoch konnten Forscher im Jahr 2008 am National Research Council am kanadischen Herzberg Institute of Astrophysics mit dem Keck- und

3 Beltoforion.de: Radialgeschwindigkeitsmethode. URL:

<https://beltoforion.de/de/exoplaneten/radialgeschwindigkeitsmethode.php>

4 Bennet, Donahue, Schneider, Voit, Lesch (Hrsg): Astronomie-Die kosmische Perspektive, 2010, S. 555

5 Weltderphysik.de: Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren? URL:

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismethoden/>

6 Weltderphysik.de: Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren? URL:

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismethoden/>

Gemini-Teleskop drei Planeten entdecken die um den sonnenähnlichen Stern HR8799 im Sternbild Pegasus kreisen. Das Infrarotbild ist deswegen eine Sensation, weil eine direkte Beobachtung vorerst für nicht möglich erschien.⁷

2.2 Eigenschaften von Exoplaneten

Exoplaneten weisen unterschiedlichste Gegebenheiten und Strukturen in ihren chemischen Zusammensetzungen oder Oberflächenparametern auf. Da der mitunter wichtigste Bestandteil der Erforschung von Exoplaneten die Suche nach potentiell fremden Leben ist, wurde der Earth Similar Index (ESI) von Mitarbeitern des Planetary Habitability Laboratory (PHL) der Universität von Puerto Rico im Jahr 2011 entwickelt.⁸ Während der ESI lediglich die Erdähnlichkeit untersucht, geht der Planetary Habitability Index (PHI) noch darüber hinaus.⁹ Dieser ist eine erweiterte Methode, um die potenzielle Lebensfreundlichkeit eines Planeten zu bewerten. Daher können sich beide Werte, trotz des gleichen Planeten maßgeblich voneinander unterscheiden. Der ESI basiert auf Faktoren wie Größe, Dichte und Oberflächentemperatur, während der PHI weitere Faktoren wie chemische Zusammensetzung, geologische Bedingungen und Energiequellen berücksichtigt. Während man Planeten zunächst nach Werten wie dem ESI oder dem PHI beurteilen kann, zählen für Forscher auch äußere Erscheinungen. Kategorisierungen nach Masse, Größe, Zusammensetzung oder ähnlichen Eigenschaften sind ebenfalls essenziell für die Verarbeitung von Informationen über andere Planeten. Bei der Größe unterscheiden Forscher zwischen Supererden, die größer als die Erde, aber kleiner als Neptun sind, Mini-Neptune, auch in dieser Größenordnung, jedoch mit dichteren Atmosphären und eventuellen Ansammlungen von Wasser auf den Oberflächen, Gasriesen wie Jupiter, und braunen Zwergen, also größeren

⁷ Bennet, Donahue, Schneider, Voit, Lesch (Hrsg): Astronomie-Die kosmische Perspektive, 2010, S. 564

⁸ Astrobiology.nasa.gov: Earth Similar Index. URL: <https://astrobiology.nasa.gov/quick-facts/earth-similarity-index/>

⁹ Welt der Physik: Der Erdähnlichkeitsindex. URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/erdaehnlichkeitsindex/>

Objekten als Planeten aber noch zu klein für die Fusion zum Stern.¹⁰ Eine weitere Möglichkeit der Kategorisierung besteht in der Unterscheidung der Zusammensetzung der Planeten. So gibt es Gesteinsplaneten, wie unsere Erde, den Mars oder die Venus, aber auch Gasriesen und Eisplaneten wie Uranus und Neptun mit extrem dichten Atmosphären bestehend aus Methan, Ammoniak oder Wasser. Auch Kohlenstoff-Planeten, die allerdings als hypothetisch bezeichnet werden, müssen berücksichtigt werden. Auch die Umlaufbahn bzw. die Distanz der Umlaufbahn zum Zentralstern lässt sich beurteilen. Neben Exoplaneten, die eine feste Umlaufbahn haben und um einen Zentralstern kreisen, gibt es auch Planeten, die ohne Zentralstern und ohne direkte Umlaufbahn durch das Universum fliegen, diese sind aber kein Bestandteil dieser Arbeit.

2.3 Unterschiede zwischen Einzel- und Mehrfachsternsystemen

Einzelsternsysteme machen etwa 20% der Sternsysteme in unserem Universum aus. Die anderen 80% sind Mehrfachsternsysteme, die aus zwei oder mehr Sternen bestehen und durch ihre Gravitation miteinander verbunden sind. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Planetenbildung. Aufgrund der gravitativen Gegebenheiten können sich Planeten in Einzelsternsystemen deutlich einfacher bilden, da sie konstant um ihren Zentralstern kreisen. Durch diese stabile Umlaufbahn können Planeten langfristig in der habitablen Zone bestehen und so die Chance auf Leben entwickeln.¹¹ In Mehrfachsternsystemen ist die Planetenbildung aufgrund der Gravitation deutlich komplexer. Die Gravitationswechselwirkungen erschweren nicht nur die Bildung, sondern beeinflussen auch bereits bestehende Planeten. Im Mehrfachsternsystemen können die Planeten verschiedene Typen von Umlaufbahnen aufweisen, falls sie

¹⁰ Spektrum.de: Woraus bestehen Exoplaneten? URL:

<https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2024-01USMS-Exoplaneten-neu.pdf>

Seite 6

¹¹ uni-jena.de: Extrasolare Welten zwischen mehreren Sonnen. URL: <https://www.uni-jena.de/223267/extrasolare-welten-zwischen-mehreren-sonnen>

existieren. Im sogenannten S-Typ umkreist ein Planet einen der Sterne im System, während weitere Sterne nicht umkreist werden und in größerer Entfernung stehen. Der P-Typ beschreibt Planeten, die sich um beide Sterne gemeinsam bewegen, ein bekanntes Beispiel ist der Exoplanet Kepler-16b.¹² Auch die Habitabilität unterscheidet sich zwischen den beiden Sternsystemen. Einzelsternsysteme bieten häufig deutlich stabilere Lichtverhältnisse und Temperaturverhältnisse, was die Entwicklung von Leben positiv beeinflusst. So konnte auch auf unserer Erde Leben entstehen. In Mehrfachsternsystemen treten allerdings häufig wechselnde Strahlungsverhältnisse und Störungen in der Dynamik der Gravitation und ihrer Wechselwirkung zwischen den Zentralsternen auf. Das führt zu extremen Klimabedingungen. Wenn die Zentralsterne jedoch weit voneinander entfernt sind, können sich unter Umständen habitable Zonen entwickeln. Der Hauptunterschied liegt also vor allem bei der komplexen Planetenbildung, der durch die extremen Bedingungen und schwierigen Gegebenheiten in Mehrfachsternsystemen entsteht.¹³ Ein bekanntes Beispiel für ein Dreifach-Sternsystem ist Alpha Centauri, bestehend aus Alpha Centauri A, B und Proxima Centauri.

3. Mehrfachsternsysteme und ihre Dynamik

3.1 Arten von Mehrfachsternsystemen

Mehrfachsternsysteme bestehen aus zwei oder mehr, durch Gravitation miteinander verbundenen Sternen, die sich um einen gemeinsamen Masseschwerpunkt, auch Baryzentrum genannt, bewegen. Doppelsternsysteme sind die einfachste Form, da sie aus zwei Sternen bestehen, die einander umkreisen. Diese Art der Mehrfachsternsysteme kommt am häufigsten vor, und macht einen gewaltigen Anteil aller bekannten Sterne in der Milchstraße aus.

¹²lp.uni-goettingen.de: Exoplaneten des S- und P-Typen. URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7689#>

¹³ Raumfahrer.net: Gasströme in Mehrfachsystemen fördern Planetenbildung
URL: <https://www.raumfahrer.net/gasstroeme-in-mehrfachsystemen-foerdern-planetenbildung/>

Auch Doppelsterne lassen sich untereinander differenzieren. Ich erkläre dabei nur die wichtigsten, da die Erklärungen aller Typen einen zu Großen Anteil an der Arbeit nehmen würden. Bei visuellen Doppelsternen können beide Sterne, aufgrund ihrer ausreichend großen Distanz mit einem Teleskop getrennt voneinander beobachtet werden. Bei Spektroskopischen Doppelsternen funktioniert diese Methode nicht. Aufgrund ihrer geringen Distanz zueinander, werden sie durch Doppelverschiebungen im Spektrum nachgewiesen. Diese Verschiebung entsteht durch den Dopplereffekt. Dabei verschieben sich die Spektrallinien von den Sternen abhängig der Bewegung relativ zu unserer Erde bzw. dem Beobachter. Bei bedeckungsveränderlichen Doppelsternen verdecken sich die beiden Sterne periodisch gegenseitig. Das führt zu messbaren Helligkeitsschwankungen, die Forschende dann messen können. Neben Doppelsternsystemen gibt es auch Dreifach- und Mehrfachsternsysteme, die ebenfalls kategorisiert werden können. Die Bahnen sind hier, wie bereits erwähnt, deutlich komplexer. Bei hierarchischen Mehrfachsternsystemen sind die einzelnen Zentralsterne in weitere Untergruppen getrennt. Hierbei kann zum Beispiel ein Zentralstern von einem Doppelstern mit einer größeren Entfernung umkreist werden. Im Gegensatz dazu gibt es eng gekoppelte Mehrfachsysteme, bei denen sich alle Zentralsterne des Systems nahe beieinander bewegen, und starre gravitative Wechselwirkungen aufeinander ausüben. Des Weiteren gibt es offene und instabile Mehrfachsternsysteme, bei denen die Stabilität nur über einen gewissen Zeitraum besteht. Starke Wechselwirkungen in der Gravitation können zu einer Transformation zu einem stabileren, hierarchischen System führen, allerdings auch zu einem Ausstoß eines oder mehrere Sterne aus dem System.¹⁴

3.2 Stabilität und typische Umlaufbahnen von Exoplaneten

Umlaufbahnen und ihre Stabilität werden maßgeblich von den Wechselwirkungen der Gravitation zwischen Zentralstern(en) und den Planeten beeinflusst. Damit diese Stabilität gewährleistet werden kann und der Exoplanet

¹⁴ Wikipedia.de: Doppelstern. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern>

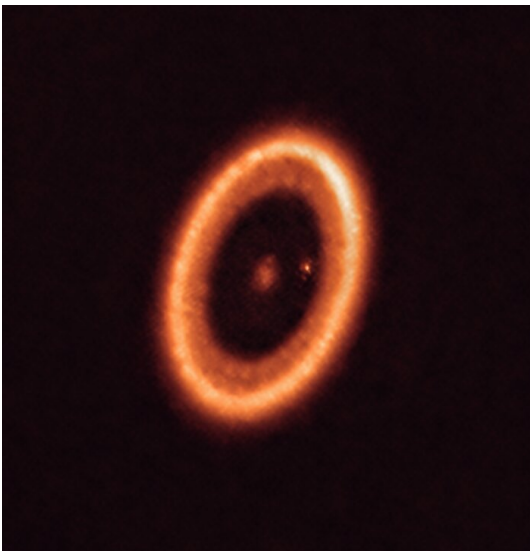
eine stabile Umlaufbahn um sein/e Zentralstern/e einhält, muss er eine gleichmäßige Bahn um seinen Zentralstern einhalten, ohne dass diese durch gravitative Störungen des Sternsystems (Einzel und Mehrfach) aus seiner Bahn, oder aus dem gesamten System geworfen wird. Die Funktionalität der Stabilität des Systems wird durch mehrere Punkte aufrechterhalten, auf die ich kurz eingehen werde. Der Abstand zum Zentralstern ist unumgänglich, da durch Strahlungsdruck oder Gezeitenkräfte die Instabilität des Orbits erhöht werden könnte. Das betrifft vor allem Exoplaneten, die deutlich näher um den Zentralstern kreisen als andere. Ein zu weit entfernter Exoplanet ist anfälliger für den Einfluss anderer Himmelskörper, oder auch anderer Sternsysteme. Durch diesen Einfluss können Exoplaneten sogar ganze Systeme verlassen und zu anderen wandern. Dieses Phänomen wird als „Sternenwanderer“ bezeichnet. Ein solcher Prozess ist allerdings rein theoretisch gestützt, und es gibt bis jetzt noch kein praktisches Beispiel eines solchen Modells. Simulationen zeigen jedoch, dass dies durchaus möglich ist. Ein großer Einfluss auf die Stabilität eines Planeten wird also durch die Umlaufbahn definiert. Exoplaneten können viele Bahnformen annehmen, die sich in ihrer Exzentrizität oder Neigung zur Äquatorebene unterscheiden. Kreisförmige Bahnen treten häufig in stabilen Sternsystemen, wie in unserem Sonnensystem, auf. Stabile Umlaufbahnen begünstigen ruhige Klimaverhältnisse und erhöhen so auch die Chancen auf Leben. Große Gasriesen weisen oft starke Temperaturschwankungen und extreme Wetterveränderungen auf, da ihre Umlaufbahnen oft exzentrisch, also elliptisch sind. Elliptische Bahnen behindern die Entwicklung eines stabilen Klimas und führen oft zu lebensfeindlichen Atmosphären. Jupiter besitzt eine leicht elliptische Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,05, bedeutet das sein Abstand zur Sonne zwischen 740 Millionen Kilometern (Perihel) und 816 Millionen Kilometern (Aphel) schwankt. Perihel beschreibt den nächsten Punkt zur Sonne, den ein Planet beim Umkreisen seines Zentralsterns erreicht. Aphel beschreibt das genaue Gegenteil, nämlich den entferntesten Punkt zur Sonne.¹⁵ Neben der exzentrischen Bahn existiert noch die retrograde Bahn. Bei dieser Umlaufbahn

¹⁵ Vgl. Astronomie.de - <https://www.astronomie.de/das-sonnensystem/planeten-und-monde/der-jupiter/grunddaten>

umkreisen die Exoplaneten ihren Zentralstern in entgegengesetzter Richtung der Rotation des Zentralsterns. Forscher vermuten, dass dieses Ereignis durch eine frühere Kollision oder extreme Gravitationskräfte entsteht.

3.3 Einfluss der Sternzahl auf die Planetenbildung

In Einzelsternsystemen ist die Planetenbildung relativ unkompliziert und läuft im Grundsatz immer nach dem gleichen Schema ab. Um den Einfluss der Sternanzahl zu erklären, gehe ich zuerst auf die Planetenbildung in Einzelsternsystemen ein, um darauf aufbauend die deutlich komplexere Planetenbildung in Mehrfachsternsystemen zu erläutern. Die Planetenbildung beginnt in einer Gas- und Staubschicht, auch protoplanetare Scheibe genannt,



die sich um einen neu gebildeten Stern dreht. Diese besteht aus Silikaten, Metallen und Gasen. Kleine Partikel aus der Staubschicht stoßen zusammen und bilden kleinere Gebilde. Diese vergrößern sich weiter zu Planetesimale, eine Art Vorstufe der späteren Planeten.

Diese Objekte sammeln durch Gravitation weitere Objekte aus der

Abbildung Exoplanet in der Entstehung Staubschicht an und entwickeln sich so zu Protoplaneten. Durch weitere Kollisionen entwickeln sich Planeten, die durch Gravitation auf ihre Umlaufbahn gebracht werden. Manche Planeten können sowohl nach innen als auch nach außen geworfen werden, sogar das ganze System verlassen. Da die Gravitation in Einzelsternsystemen eben stabil ist, können so langlebige und stabile Planetensysteme entstehen.¹⁶ Ich betrachte diese erklärten Abläufe jetzt in

¹⁶ Spektrum.de: Planetenentstehung. URL:

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/planetenentstehung/11322>

Abbildung 2: Zu sehen ist hier das PDS-70 System in fast 400 Lichtjahren Entfernung. In der Mitte befindet sich der Zentralstern, und die protoplanetare Scheibe drumherum. Zwischen Stern und Scheibe befindet sich der Exoplanet (kleiner Punkt, rechts). Der Planet hat eine Lücke in die Scheibe gegraben, und Material zum Wachsen herausgezogen.

Abhängigkeit eines weiteren Sterns, bzw. betrachte die Planetenbildung in einem Mehrfachsternsystem. Die Entstehung beginnt auch in einem Mehrfachsternsystem mit der protoplanetaren Scheibe, jedoch verhält sich dieses Stadium der Planetenentstehung deutlich komplexer als bei Einzelsternsystemen: Durch die komplexen gravitativen Wechselwirkung die Zentralsterne in einem Mehrfachsternsystem aufeinander übertragen, gerät die proplanetare Scheibe in dem Gravitationsfeld in eine instabile Position, da die Wechselwirkungen eben auch auf die Staubteilchen wirken. Ein zweiter oder dritter Stern kann durch seine Gravitation Material der proplanetaren Scheibe herausziehen und die äußeren Bereiche abbremsen. Das schränkt die Planetenbildung auf einen kleineren Bereich ein. Alleine die Bildung einer stabilen Scheibe ist also deutlich unwahrscheinlicher als bei Einzelsternsystemen. Die Stabilität kann also nicht prädisponiert werden, welche grundsätzlich unumgänglich für die Planetenbildung ist. Mehrfachsternsysteme können unterschiedlich in ihrer Sternanzahl konfiguriert sein, auch durch den Abstand der Sterne in Doppelsternsystemen. Hierbei fokussiere ich mich auf folgende 3 Arten: Weite Doppelsternsysteme, nahe Doppelsterne und Dreifach- und Mehrfachsternsysteme. Bei weiten Doppelsternsystemen liegt ein großer Abstand zwischen den Sternen vor. Planeten könne sich hier noch relativ stabil bilden, ohne große gravitative Störungen. Nahe Doppelsternsysteme sind anatomisch, bis auf die Entfernung der Zentralsterne zueinander, die deutlich geringer ist, gleich aufgebaut. Das Material, aus dem die Planeten entstehen, wird in der proplanetaren Scheibe ungleichmäßiger verteilt und die Bildung eines Planeten somit erschwert. Bei Dreifach- oder Mehrfachsternsystemen wird die Planetenbildung nochmals deutlich komplexer, was sich vor allem mit den unterschiedlichen Gravitationskräften der Zentralsternen erklären lässt. Die proplanetare Scheibe kann durch den Einfluss der verschiedenen gravitativen Wechselwirkungen instabil werden oder sogar völlig zerstört werden. Trotz dieser Theorie gibt es reale Beispiele wie Kepler-47, ein bekanntes Planetensystem mit zwei Zentralsternen und einem Dritten weiter entfernt liegenden Stern. Da die Bildung trotz der Diskrepanzen nicht ausgeschlossen ist, ist auch die dauerhafte

Stabilität erforderlich. Gravitative Resonanzen können auch verhindern, dass sich bestimmte Planetentypen bilden. So gibt es keinen Gasriesen im Sternsystem Alpha Centauri, da Resonanzeffekte keine Bildung großer Gasplaneten zulassen. Eine Langzeitinstabilität kann auch dazu führen, dass Mehrfachsternsysteme ihre Planeten erst nach Millionen von Jahren verlieren, was auch zum Teil durch die hohe Ejektionseffizienz erklärt werden kann. Die Anzahl der Sterne in einem Sternsystem hat großen Einfluss auf die Planetenbildung. Dabei kann man grundsätzlich feststellen: Je mehr Sterne in einem Sternsystem, desto unwahrscheinlicher die Planetenbildung.

4 Exoplaneten in Mehrfachsternsystemen

4.1 Bekannte Beispiele und ihre Besonderheiten

Forscher haben bereits tausende Exoplaneten entdeckt, die sich in ihrer Erscheinung, Zusammensetzung und den Eigenschaften oft ähneln. Neben diesen typischen Planeten haben Forscher in der Vergangenheit jedoch auch bekannte Exoplaneten entdeckt, die sich durch gewisse Besonderheiten auszeichnen. In diesem Abschnitt möchte ich einen kurzen Einblick in die Besonderheiten von zwei Exoplaneten geben. Zuerst werfe ich einen Blick auf Kepler-438b, ein erdgroßer Exoplanet der sich in der habitablen Zone um seinen Stern befindet und einen ESI von 0,88 aufweist (Erde = 1). Das bedeutet, dass auf seiner Oberfläche theoretisch Leben möglich ist, da Temperaturen herrschen, die die Existenz von flüssigem Wasser ermöglichen. Seine Entdeckung war eine Sensation, da Kepler-438b der erdähnlichste Exoplanet ist.¹⁷ Ein weiterer Kandidat ist der Exoplanet K2-18b, auf dem Forscher eventuell Dimethylsulfid, $\text{CH}_3\text{-S-CH}_3$, oder kurz DMS gefunden haben. Das James-Webb Teleskop beobachtete den Planeten in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Dadurch

¹⁷ Watson.ch: Das sind die Top Ten der Exoplaneten, auf denen es Leben geben könnte, URL: <https://www.watson.ch/wissen/astronomie/578510805-das-sind-die-top-ten-der-exoplaneten-auf-denen-es-leben-geben-koennte>

wurden unter anderem Methan und Kohlendioxid festgestellt. Tatsächlich könnten in dem Spektrum auch Spuren von DMS gefunden worden sein.¹⁸

5 Methoden und Herausforderungen der Forschung

5.1 Geplante Missionen und Zukunftsaussichten

Die Forschung entwickelt sich weiter, auch wenn es um Exoplaneten geht. Erhebliche Fortschritte tragen dazu bei, dass zahlreiche Missionen in Zukunft geplant sind, und der theoretische Nachweis für fremdes Leben für manche Forscher nur noch eine Frage der Zeit ist. Um die Forschung weiter voran zu treiben, plant die Europäische Weltraum Organisation (kurz: ESA) den Start des Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (kurz: ARIEL) im Jahr 2028, um die chemischen und thermischen Eigenschaften von Exoplaneten zu analysieren. Damit können Forscher die Zusammensetzung und Struktur der Atmosphäre von Planeten besser untersuchen.¹⁹ Eine weitere Mission ist das Planetary Transits and Oscillations of Stars (kurz: PLATO) der ESA, dessen Start für 2026 geplant ist. Dieses Teleskop wird mit 26 Kameras ausgestattet sein, um die Atmosphären von Exoplaneten, die um sonnenähnliche Sterne kreisen, zu erforschen. Auch Monde und Ringe werden Bestandteile der Forschung sein.²⁰ Der Start dieser Missionen läutet ein neues Zeitalter in der Erforschung von Exoplaneten ein. Die kontinuierliche Verbesserung von Beobachtungstechniken, wie Teleskopen und Kameras, wird in Zukunft ein großer Bestandteil in der weiteren Vorgehensweise sein, und den Forschern helfen, neue Welten zu entdecken und bereits bekannte noch besser und detaillierter zu analysieren. Die nächsten Jahrzehnte werden eine Fülle an Informationen bereithalten und eventuell auch eine Antwort auf die alles entscheidende Frage in der Erforschung von Exoplaneten liefern: Sind wir allein in unserem Universum?

18 dlr.de: Dimethylsulfid: ein Lebenszeichen auf dem Exoplaneten K2-18b? URL: <https://www.dlr.de/de/pf/ueber-uns/abteilungen/epa/epa-nachrichten/dimethylsulfid-ein-lebenszeichen-auf-dem-exoplaneten-k2-18b>

19 Nextvision.de: Die 20 wichtigsten Raumfahrtprojekte und Missionen für das nächste Jahrzehnt. URL: <https://nextvisions.de/die-20-wichtigsten-raumfahrtprojekte/>

20 Esa.int: Plato. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato

6 Fazit

Die letzten Jahrzehnte machten die Erforschung von Exoplaneten zu einem der interessantesten Themenbereiche in der Astronomie. Von der ersten Entdeckung im Jahr 1995 durch die Radialgeschwindigkeitsmethode bis hin in die Gegenwart, geprägt von modernsten Teleskopen und Kameras. Und darüber hinaus in die Zukunft zu geplanten Missionen, die uns einen noch besseren und detaillierteren Einblick in vollständig fremde Welten versprechen. Trotz immer weiterer Fortschritte in der Technologie bleiben fundamentale Fragen über die Planetenstabilität bestehen und zeigen, wie komplex die Umlaufbahnen in Mehrfachsternsystemen werden können. Das beeinflusst die potenzielle Bewohnbarkeit massiv. Trotz aller Fortschritte der Technologie macht die Entfernung anderer Welten eine Erforschung mit Raumsonden unmöglich. Die Bewohnbarkeit anderer Planeten ist gleichwohl die wichtigste Essenz dieser Forschung. Der Mensch verantwortet den Fortschritt und auch obwohl noch nicht alle Fragen abschließend geklärt sind, zeigt die Entwicklung, dass die Antworten in greifbarer Nähe sind. Die letzten Jahre lieferten quantitativ gute Forschungsergebnisse, mit einer großen Zahl an entdeckten Planeten. Die kommenden Jahre werden eine Phase der qualitativen Erforschung sein. Schlussendlich lässt sich sagen, dass noch viele Entdeckungen nötig sind, um alle Fragen zu beantworten, jedoch auch, dass viele dieser Fragen schon in naher Zukunft eine Antwort erwarten dürften.

7 Anhang

Quellenverzeichnis

Abbildungen:

Deckblatt: Logo GGB

<https://www.greselius.de/wir-stellen-uns-vor/unser-logo>

Abbildung 1

<https://www.spektrum.de/news/wenn-exoplaneten-verstecken-spielen/1462647>

Abbildung 2

<https://www.eso.org/public/germany/images/eso2111b/>

Literaturquellen:

Bennet, Donahue, Schneider, Voit, Lesch (Hrsg): Astronomie-Die kosmische Perspektive, 5. Auflage, 2010, S. 555-564

Internetquellen:

(1) Nasa – The babitable Zone

(Abruf:26.02.2025)

<https://science.nasa.gov/exoplanets/habitable-zone/>

(2) Wikipedia – Baryzentrum

(Abruf: 26.02.2025)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Baryzentrum>

(3) Beltoforion – Die Radialgeschwindigkeit

(Abruf: 27.02.2025)

<https://beltoforion.de/de/exoplaneten/radialgeschwindigkeitsmethode.php>

(4) Siehe. Literaturquellen

- (5) Bükér, Michael: Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren? (01.11.2013), URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismet hoden/>
- (6) Bükér, Michael: Wie lassen sich Exoplaneten aufspüren? (01.11.2013), URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/nachweismet hoden/>
- (7) Siehe Literaturquellen
- (8) Nasa – Earth Similiar Index (ESI), URL: <https://astrobiology.nasa.gov/quick-facts/earth-similarity-index/>
- (9) Bieker, Helen: Der Erdähnlichkeitsindex (22.05.2015), URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/exoplaneten/erdaehnlichkeitsinde x/>
- (10) Nielbock, Markus: Woraus bestehen Exoplaneten? URL: <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2024-01USMS-Exoplaneten-neu.pdf>
- (11) Schönefelder, Ute: Extrasolare Welten zwischen mehreren Sonnen (17.01.2024), URL: <https://www.uni-jena.de/223267/extrasolare-welten-zwischen-mehreren-sonnen>
- (12) b_dimond: Exoplaneten des P- und S-Typs (21.01.20), URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7689#>
- (13) Redaktion: Gasströme in Mehrfachsternsystemen fördern Planetenbildung (05.11.2014) URL: <https://www.raumfahrer.net/gasstroeme-in-mehrfachsystemen-foerdern-planetenbildung/>
- (14) Wikipedia – Doppelsterne, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern>
- (15) Astronomie.de: URL: <https://www.astronomie.de/das-sonnensystem/planeten-und-monde/der-jupiter/grunddaten>
- (16) Spektrum.de – Planetenbildung, URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/planetenentstehung/11322>
- (17) Huber, Daniel: Das sind die Top Ten der Exoplaneten, auf denen es Leben geben könnte (07.11.2015), URL: <https://www.watson.ch/wissen/astronomie/578510805-das-sind-die-top-ten-der-exoplaneten-auf-denen-es-leben-geben-koennte>

- (18) Institut für Planetenforschung: Dimethylsulfid: ein Lebenszeichen auf dem Exoplaneten K2-18b? (03.05.2024) URL: <https://www.dlr.de/de/pf/ueberuns/abteilungen/epa/epa-nachrichten/dimethylsulfid-ein-lebenszeichen-auf-dem-exoplaneten-k2-18b>
- (19) Nextvision.de: Die 20 wichtigsten Raumfahrtprojekte und Missionen für das nächste Jahrzehnt. URL: <https://nextvisions.de/die-20-wichtigsten-raumfahrtprojekte/>
- (20) ESA: plato, URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.“

Ort, Datum und Unterschrift

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.“

Ort, Datum und Unterschrift

