

Planeten um ferne Sterne

Was wissen wir über extrasolare Planeten?

Immer wieder gehen Nachrichten von neu entdeckten Planeten um andere Sterne durch die Presse. Was wissen wir wirklich über sie? Mit welchen Methoden wird gearbeitet? Was ist mittlerweile darüber bekannt, wie andere Planeten und Sonnensysteme beschaffen sind? Ein Einblick in das junge und dynamische Gebiet der Erforschung ferner Planeten soll Antworten auf diese Fragen geben.

Albrecht Ehrmann

Introbild Künstlerische Darstellung eines Exoplanetensystems. Die Planeten sind nicht direkt beobachtbar. (NASA)

Einführung

Die Erforschung von Planeten außerhalb unseres eigenen Sonnensystems hat seit den ersten Entdeckungen in den 1990er-Jahren eine stürmische Entwicklung genommen. Mehrere Weltraumteleskope suchten und suchen extrasolare Planeten, die um andere Sterne als die Sonne kreisen, und auch auf erdgebundenen Teleskopen laufen jahrelange Beobachtungsprogramme. Mittlerweile wurden mehr als 4000 extrasolare Planeten entdeckt. Neben dem akademischen Interesse, außer den Sternen nun auch deren Planeten besser zu verstehen, ist der Treibstoff für diese Entwicklung auch die Suche nach Leben im Universum außerhalb der Erde.

Während Sterne als bereits an der Oberfläche mehrere Tausend Grad heiße Gaskugeln für Leben *per se* ungeeignet sind, trifft dies auf Planeten nicht von vornherein zu. Wer findet als erster einen Planeten, der in der nachweisbaren

Größe und Entfernung vom Zentralgestirn der Erde gleicht und dessen Atmosphäre Charakteristika aufweist, die für Leben ähnlich wie auf der Erde als notwendig erachtet werden? Der Nobelpreis wäre ihm sicher. Nachdem schon jahrzehntelang Filme durch unsere Kinos und Wohnzimmer flimmern, in denen Menschen Außerirdischen begegnen, ist die Sehnsucht groß, diese Pseudo-Erfahrung von der Wissenschaft bestätigt zu bekommen. Evolutionsbefürworter würden es als Bestätigung auffassen, dass die Evolution auch woanders funktionierte. Statt die Erde als einzigartiges Geschenk Gottes an uns Menschen wahrzunehmen, das wir bebauen und bewahren sollen, fantasiert man über die Kolonisierung anderer „Erden“ außerhalb unseres Sonnensystems. Derzeit ist dies aber absolut unmöglich. Doch bei der Verteilung von knappen und teuren Teleskopzeiten werden Programme zur Suche nach Leben im All gerne bevorzugt.

Aber auch wer Gott als Schöpfer des Universums anerkennt, interessiert sich dafür, wie Planeten um andere Sterne beschaffen sind. Doch was weiß man heute über extrasolare Planeten? Wie typisch ist unser Sonnensystem? Dieser Artikel soll dazu einen Überblick verschaffen.

Wie finden wir extrasolare Planeten?

Der Weg führt über das Sternenlicht

Jahrhundertlang gehörte mangels technischer Möglichkeiten die Erforschung extrasolarer Planeten nicht zu den aktiv betriebenen Gebieten der Astronomie. Stattdessen wurde intensiv an Sternen geforscht. Ihr Licht erreicht uns von überall her, selbst einzelne helle Sterne aus anderen Galaxien können untersucht werden. Man beobachtet heiße, Licht abstrahlende Zentren in dichten Gaswolken, die als entstehende Sterne interpretiert werden. Man beobachtet auch Sterne in dichten Gaswolken, in Supernovae explodierende Sterne und das, was nach der Explosion von den Sternen übrigbleibt – weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Mit Hilfe der Daten von zehntausenden von Sternen wurden Modelle entwickelt, die Lebenszyklen von Sternen beschreiben. Aus gemessener Entfernung und Helligkeit wird die Abstrahlungsleistung berechnet. Anhand ihrer Spektren, die im Wesentlichen mit Absorptionslinien* durchsetzte Schwarzkörperspektren sind, gewinnt man eine Fülle an Information, zum Beispiel über die Oberflächentemperatur, Fallbeschleunigung an der Oberfläche und über relative Elementhäufigkeiten. Beobachtet man diese Spektren über einen gewissen Zeitraum, sieht man Schwingungen, durch die man auf die Schichtung im Sterninnern schließen kann. Die Masse von Sternen kann man in Doppelsystemen bestimmen. Für einige nahe oder große Sterne kann man sogar den Durchmesser und die Abplattung aufgrund ihrer Rotation durch Interferometrie* direkt messen. Die wichtigste Erkenntnis aus der Erforschung der Sterne und daraus entwickelter theoretischer Vorstellungen ist, dass sie während der meisten Zeit ihres Lebenszyklus ziemlich stabil sind und dass man aus dem Licht eines Sternes ableiten kann, wie groß und schwer er ist.

Diese Informationen über die Sterne sind wichtig, weil man zur Auffindung und Charakterisierung der Planeten ein gutes Verständnis der Sterne benötigt, um die die Planeten kreisen. Fast alle Planeten wurden ausschließlich dadurch gefunden, dass man das Licht von Sternen genau untersucht, und in diesem Licht Hinweise auf Planeten findet.

Kompakt

Bislang wurden über 4000 extrasolare Planeten gefunden. Die Planetensysteme treten in einer größeren Fülle und Verschiedenheit auf, als zunächst erwartet worden war. Einfache Modelle reichen nicht aus, um diese Fülle vorherzusagen. Dennoch kristallisiert sich heraus, dass die Mehrzahl der Systeme grob zur herrschenden Planetenentstehungstheorie passt. Man muss allerdings bedenken, dass die Astrophysiker noch weit davon entfernt sind, Planetenentstehung im Detail zu verstehen. Auf dem Weg von Gasmolekülwolken mit submikrometergroßen Staubeilchen zu Planeten gibt es noch etliche Schritte, für die kein überzeugendes Modell vorliegt. Außerdem sind die Möglichkeiten, den gesamten Prozess durch Simulationsrechnungen nachzuvollziehen, nicht ausreichend. Die Modellierungen liefern also keinesfalls zwingende Ergebnisse.

Es kann noch nicht gesagt werden, ob unser Sonnensystem typisch oder untypisch ist. Planeten mit so langen Umlaufzeiten und Entfernungen von ihrem Stern wie die Gasplaneten des Sonnensystems oder so kleine Planeten wie die inneren Planeten des Sonnensystems wurden noch nicht genügend erfasst.

Die Erforschung extrasolarer Planeten ist ein sehr spannendes Teilgebiet der Astronomie und wird es auch noch einige Jahrzehnte lang bleiben. In den nächsten zehn Jahren sind deutliche Fortschritte zu erwarten, falls die nächste Generation Großteleskope wie geplant fertiggestellt wird und das James-Webb-Weltraumteleskop tatsächlich Beobachtungsdaten zu Planeten aufnimmt.

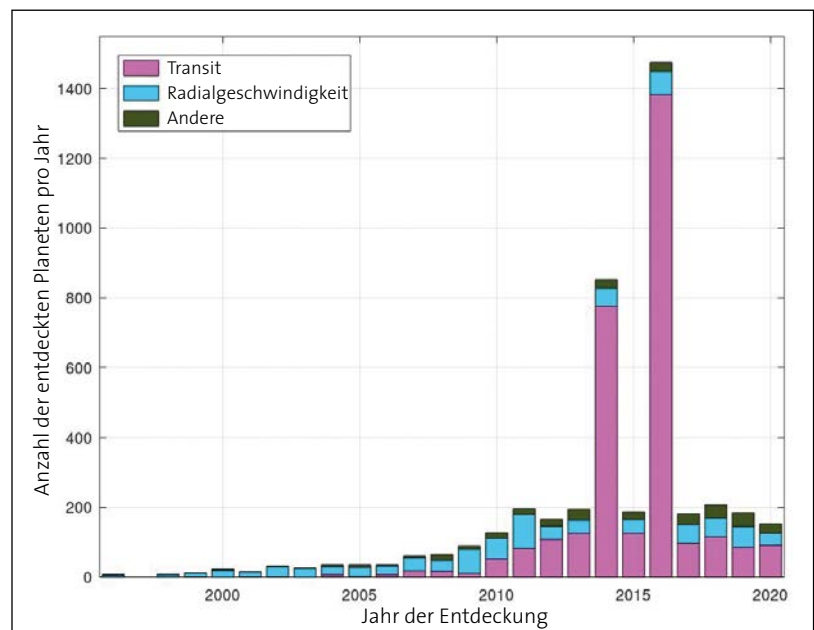
Wie viele Planeten wurden bisher gefunden?

Mit Stichtag 27.10.2020 sind 4368 Exoplaneten in 3228 Systemen bekannt (THE EXTRASOLAR PLANETS ENCYCLOPAEDIA 2020). Knapp drei Viertel von ihnen, genau 3107, wurden mit der Transitmethode gefunden, ungefähr ein Viertel, genau 909, mit der Radialgeschwindigkeitsmethode und 348 mit anderen Methoden (Abb.1). Wie funktionieren diese Methoden, und was kann man aus den Messdaten schließen?

Die Transitmethode – partielle Sternfinsternis

Die Transitmethode ist im Prinzip denkbar einfach: Man richtet ein Teleskop auf einen Stern

Abb. 1 Anzahl entdeckter extrasolarer Planeten seit 1996 (THE EXTRASOLAR PLANETS ENCYCLOPAEDIA 2020)



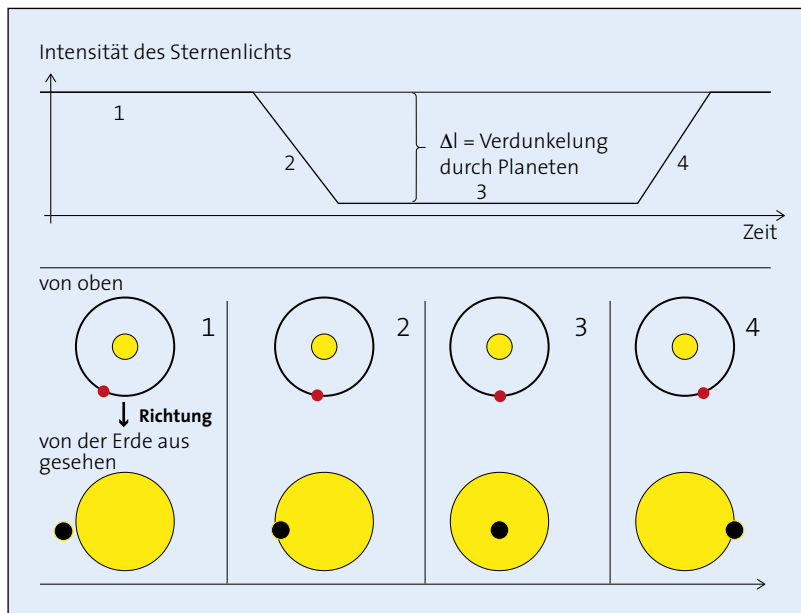
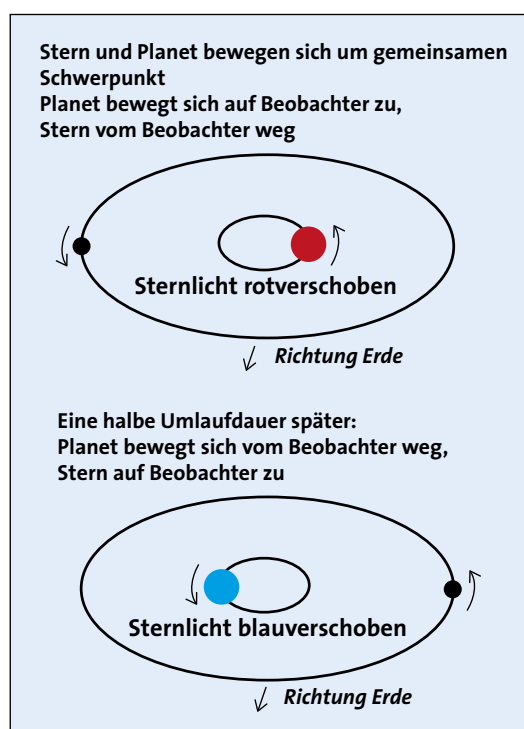


Abb. 2 Auf das Wesentliche reduziertes Schema eines Transits eines Planeten vor einem Stern, oben: der mit der Teleskopkamera aufgenommene zeitliche Verlauf der Intensität, Mitte: Transit senkrecht zur Bahnebene betrachtet, unten: Transit von der Erde (Beobachter) aus gesehen.

und misst über einen längeren Zeitraum die vom Stern kommende Lichtleistung. Zieht ein Planet auf seiner Bahn um den Stern in der Sichtlinie zwischen Teleskop und Stern vor dem Stern vorbei, verdunkelt er den Stern in erster Näherung um das Flächenverhältnis der längs dieser Linie projizierten Fläche von Planet und Stern (Abb. 2). Himmelskörper von Planeten-größe sind ebenso wie noch größere Körper nur als Kugel mechanisch stabil. Man kann das in unserem Sonnensystem sehen: Planeten und große Monde wie der Erdmond oder die galileischen Jupitermonde sind annähernd Kugeln; kleinere Objekte wie Asteroiden oder die Marsmonde Phobos und Deimos sind unregelmäßig, zum Beispiel kartoffelförmig. Von der Kugelgeometrie ausgehend ermittelt man aus dem Flächenverhältnis von Sonne und Planet das

Abb. 3 Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode



Radiusverhältnis. Da auf die Eigenschaften des Sterns, also auch auf den Radius, aus Eigenschaften des ausgestrahlten Lichts geschlossen werden kann, kann man den Radius des Planeten bestimmen.

Um aus der zeitweisen Verdunkelung des Sternenlichts auf einen Planeten schließen zu können, muss man mehrere dieser Transits nachweisen. Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Transits entsprechen der Umlaufdauer des Planeten um den Stern, mit Hilfe der Sternmasse schließt man unter Anwendung der Kepler'schen Gesetze auf den mittleren Abstand vom Stern.

Radialgeschwindigkeitsmethode: Dopplereffekt im Sternenlicht

Bei dieser Methode nutzt man die Gravitationskraft der Planeten auf ihren Stern aus. Diese sorgt dafür, dass sich der Stern um den gemeinsamen Schwerpunkt von Stern und allen Planeten bewegt. Diese Bewegung erzeugt einen Dopplereffekt*, den man mit hochgenauen Spektrometern im Spektrum des Sterns beobachten kann: Bewegt sich der Stern auf die Erde zu, ist sein Licht blauer, bewegt er sich von ihr weg, rötlicher. Man misst damit die Radialgeschwindigkeitskomponente der Bewegung, d. h. die Komponente längs der Sichtlinie Stern-Teleskop. Aus dieser wird das Massenverhältnis zwischen Planet und Stern bestimmt, allerdings nur die minimale Masse des Planeten. Diese minimale Masse ist gleich der realen Masse, wenn die Sichtlinie in der Umlaufbahn des Planeten liegt. Läge die Sichtlinie senkrecht zur Umlaufbahn, würde auch ein unendlich massereicher Planet keine Radialgeschwindigkeitsvariation im Sternenlicht hinterlassen.

Außer der minimalen Masse erhält man auch die Umlaufdauer des Planeten um den Stern und Eigenschaften der Bahn parallel zur Sichtlinie.

Andere Methoden

Die direkte Abbildung von Planeten mit Teleskopen ist bisher für 142 Planeten gelungen. Es handelt sich dabei meist um heiße, jupitergroße

Kaum hatte man die Beobachtungsprogramme gestartet, begegnete man Planeten, die man vorher für unmöglich gehalten hätte.

Planeten in großer Entfernung vom Stern. Ähnlich viele, nämlich 131, hat man mithilfe von Microlensing entdeckt. Bei dieser Methode nutzt man aus, dass auch das Licht durch die

Schwerkraft abgelenkt wird. Für passende Entfernungen zwischen einem Hintergrundstern, einem Stern mit Planeten, die als Gravitationslinsen wirken, und dem irdischen Beobachter kommt es zu einer einige Tage dauernden Aufhellung des Sternenlichts des Hintergrundsterns. Aus der Lichtkurve kann man auf Eigenschaften des Planeten schließen.

Was hat man aus den bisherigen Beobachtungen gelernt?

Die wichtigsten Daten der bisher gefundenen Planeten sind in den Internet-Katalogen www.exoplanet.eu und exoplanetarchive.ipac.caltech.edu für jedermann zugänglich. Die NASA hat auf ihren Seiten exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog das Thema publikumsgerecht aufbereitet, so dass auch Nichtspezialisten sich über die bisher gefundenen Planeten informieren können. Die hier präsentierten Diagramme wurden mit den Daten von www.exoplanet.eu erstellt.

Überraschungen in den ersten Jahren

Die ersten Jahre der Suche nach Exoplaneten waren von großer Verwunderung geprägt. Man hatte erwartet, dass auch bei anderen Sternen die Planetensysteme ähnlich aufgebaut seien wie unser Sonnensystem: in einem inneren Bereich einige kleinere Gesteinsplaneten wie Merkur, Venus, Erde und Mars, weiter außen, jenseits der sogenannten Eislinie*, Gasriesen wie Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Kaum hatte man jedoch die Beobachtungsprogramme gestartet, begegnete man Planeten, die man vorher für unmöglich gehalten hätte: Gasriesen, deren Umlaufbahnen sehr nah am Stern waren, mit Umlaufdauern von nur wenigen Tagen.

Auch bei den Eigenschaften der Planeten selbst, also ihrer durch Masse und Radius charakterisierten Größe, gab es einen wichtigen Zugewinn der Erkenntnis: In unserem Sonnensystem gibt es keine Zwischengröße zwischen Erde und dem viermal größeren Neptun. In der Statistik der aufgefundenen Exoplaneten sind die Planeten dieser Zwischengröße dagegen die häufigsten. Haben sie eine mittlere Dichte wie die Gesteinsplaneten unseres Sonnensystems, nennt man sie „Supererden“, entspricht diese derjenigen unserer Gasplaneten, handelt es sich um „Sub-Neptune“.

Eine zweite Überraschung gab es, als man mit dem Kepler-Weltraumteleskop Planetensysteme mit vielen Planeten mit relativ nahe beieinander liegenden Umlaufbahnen fand. Ein Beispiel dafür ist das System um den sonnen-

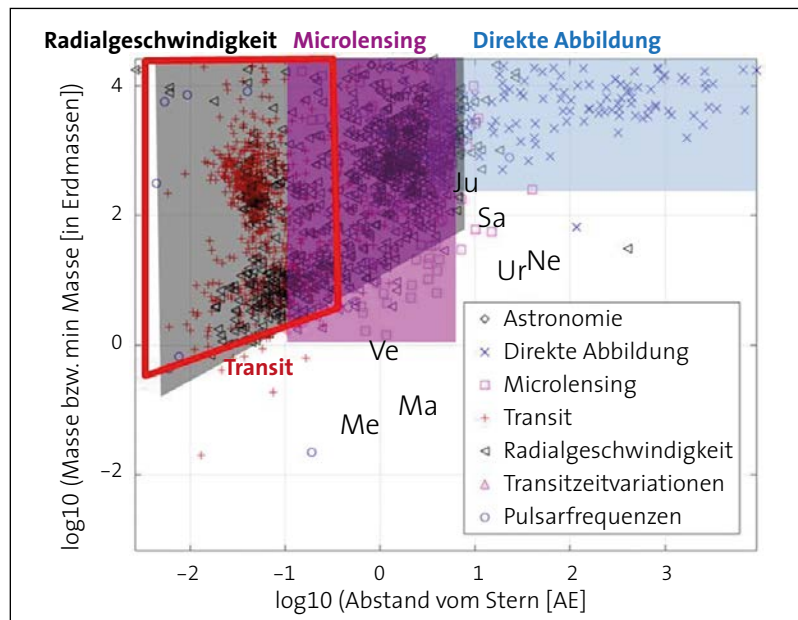


Abb. 4 Planeten, deren Masse oder minimale Masse bekannt ist, logarithmisch aufgetragen über den Abstand zum Stern und nach Entdeckungsmethode aufgeschlüsselt; zum Vergleich sind die Planeten unseres Sonnensystems eingetragen (Me = Merkur, V = Venus, E = Erde, Ma = Mars, J = Jupiter, S = Saturn, U = Uranus, N = Neptun). 1 AE = 1 Astronomische Einheit = Abstand Erde-Sonne.

ähnlichen Stern Kepler-11, um den fünf Planeten mit Umlaufdauern zwischen 10 und 47 Tagen kreisen und ein weiterer mit 118 Tagen Umlaufdauer. Zum Vergleich: In unserem Sonnensystem befindet sich in diesem Bereich nur der Planet Merkur mit 88 Tagen Umlaufdauer. Damit hatte vorher niemand gerechnet, da man erwartet hatte, dass solche Systeme nicht langzeitstabil wären.

Nachträglich durchgeführte Simulationsrechnungen lieferten allerdings als Ergebnis, dass sie doch langzeitstabil sein könnten. Da man die Bahnparameter und die Massen der Planeten allerdings nicht so genau kennt wie bei den Körpern unseres Sonnensystems, kann nur rechnerisch überprüft werden, ob es stabile Bahnen im von den Messergebnissen her möglichen Parameterraum geben kann. Es wird sogar so vorgegangen, dass man die Ergebnisse der Rechnungen verwendet und unter der Voraussetzung, dass die Bahnen langzeitstabil sind, den

Tab. 1 Die wichtigsten Methoden zum Nachweis von Planeten

Methode	Erfassung	Erfasste Planeten
Transit	Planetenradius; bei mehreren Planeten im System über Umlaufzeitenvariationen Rückschluss auf relative Massen	≥ Erdgröße; bis 200 Tage Umlaufdauer; bis einige hundert Parsec* Entfernung von der Erde
Radialgeschwindigkeit	Minimale Planetenmasse wird ermittelt	≥ Neptunmasse; bis einige Jahre Umlaufdauer; bis ca. 100 Parsec
Direkte Abbildung	Spektrum	≥ Jupitergröße; ab mehrere Jahre Umlaufdauer; bis ca. 100 Parsec nur heiße Planeten
Microlensing	Planetenmasse	≥ Erdmasse; ein bis mehrere Jahre Umlaufdauer; ca. 2000 bis 4000 Parsec

Glossar

Absorptionslinien: Heiße Gase an der Oberfläche von Sternen verschlucken die von weiter innen kommende Strahlung in durch ihre atomaren Eigenschaften bestimmten engen Wellenlängenbereichen; dadurch kann man feststellen, welche chemischen Elemente in welcher Häufigkeit dort vorkommen.

Astronomische Einheit (AE): Astronomische Längeneinheit, die ungefähr dem mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne entspricht. Sie ist auf 149 597 870 700 Meter festgesetzt.

Brauner Zwerg: Ein brauner Zwerg ist ein Himmelskörper mit einer Masse zwischen 13 und 80 Jupitermassen. Im Gegensatz zu normalen Sternen fusioniert in ihrem Innern nicht der normale Wasserstoff, sondern nur das weitaus weniger häufige → Deuterium.

Deuterium: Isotop des Wasserstoffs. Während der Atomkern des normalen Wasserstoffs nur aus einem Proton besteht, besitzt der Kern eines Deuteriumatoms ein Proton und ein Neutron.

Doppler-Effekt: Der nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler benannte Effekt tritt auf, wenn ein Schall- oder Lichtwellen aussendendes Objekt sich auf einen Beobachter zu oder von

ihm weg bewegt. Dabei erhöht sich die wahrgenommene Frequenz der Wellen, wenn sich das Objekt auf den Beobachter zu bewegt.

Eislinie: Die Eislinie markiert die Entfernung vom Stern, jenseits der Wasser in der Gas- und Staubwolke als Eiskristall vorliegt; weiter innen ist Wasser wegen der dort höheren Temperaturen gasförmig.

Interferometrie: Bei der Überlagerung von Wellen entstehen bestimmte Muster, sogenannte Interferenzen. Die Eigenschaften dieser Muster erlauben Rückschlüsse auf die die Wellen aussendende Quelle, zum Beispiel deren Ausdehnung. Bei der Sterninterferometrie kann man so den Winkeldurchmesser bestimmen, unter dem von der Erde aus ein Stern erscheint. Kennt man die Entfernung, kann man daraus den Sterndurchmesser berechnen.

Parsec: Kurzwort aus „Parallaxensekunde“. Das Parsec, Einheitenzeichen pc, ist eine in der Astronomie übliche Längeneinheit und entspricht 3,26 Lichtjahren bzw. $3,0857 \cdot 10^{16}$ Meter. Aus dieser Entfernung erscheint der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne unter einem Winkel von einer Bogensekunde.

lich sauber wäre es, entweder nur das Ergebnis der Berechnungen zu präsentieren oder die Annahmen hinter einer derartigen Schlussfolgerung explizit zu benennen.

In eine ähnliche Kategorie bezüglich der Langzeitstabilität fallen Planeten, die um Doppelsterne kreisen. Dynamische Simulationen zeigen, dass es instabile und stabile Regionen um Doppelsterne gibt. Bisher stimmen die Beobachtungen damit überein, dass Planeten nur in den stabilen Regionen zu finden sind.

Insgesamt gesehen ist die Bandbreite an unterschiedlichen Planetensystemen viel größer als ursprünglich erwartet. Man hat auch Planeten um Riesensterne gefunden, und andere, die um „Sternleichen“, also weiße Zwerge und Neutronensterne, kreisen, und mit ziemlicher Sicherheit auch Planeten um entstehende Sterne. Die Anzahl gefundener Planeten ist inzwischen groß genug, um statistisch relevante Aussagen über charakteristische Eigenschaften der Systeme zu machen.

Welche Charakteristika weisen die entdeckten Planetensysteme auf?

Eine Anzahl von über 4000 Planeten erlaubt, nach typischen Eigenschaften der Planeten und der Planetensysteme zu suchen. Welche Zusammenhänge kann man erkennen? Um nicht Äpfel mit Birnen zu vergleichen, werden die Ergebnisse für jede Methode gemäß GAUDI (2020) separat betrachtet.

Die meisten Planeten wurden mit der Transitmethode entdeckt (Abb. 5).

Quantitativ den größten Fortschritt erreichte man durch das Kepler-Weltraumteleskop (Abb. 6), das tausende Planeten entdeckte. Der Fangbereich des Messprogramms eignete sich hauptsächlich für den Nachweis von Planeten, die nah am Stern, bis etwa zur Merkurbahn-Entfernung umlaufen. Folgende Charakteristika stellten sich für diesen Bereich heraus:

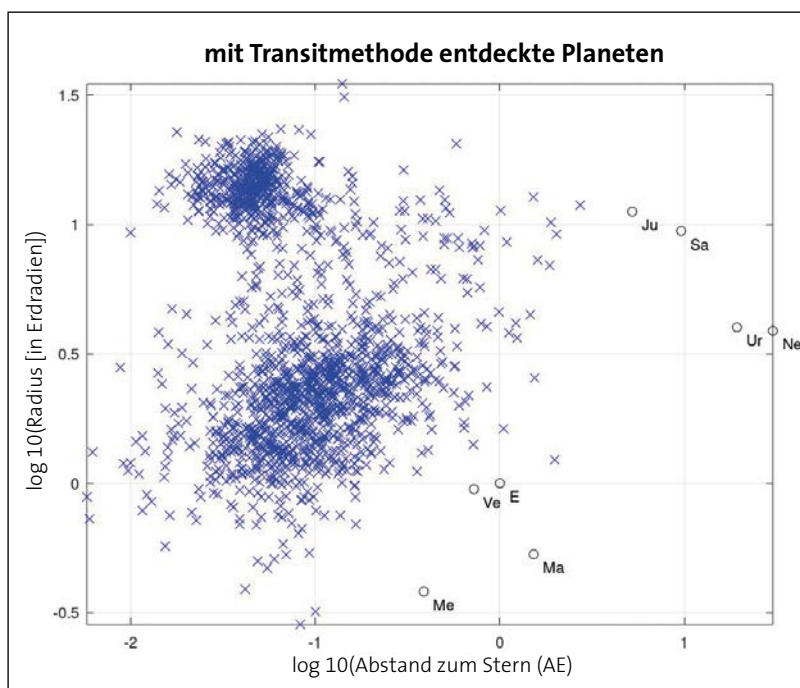
1. Planeten mit Größen um 1,7 Erdradien kommen weniger häufig vor als etwas kleinere oder größere Planeten („the Radius Gap“, FULTON & PETIGURA 2018). Die Planeten zwischen 1,0 und 1,7 Erdradien nennt man Super-Erden, die Planeten von 1,7 Erdradien bis 4,0 Erdradien Sub-Neptune.

2. Es gibt viel weniger neptungroße Planeten sehr nah am Stern als größere und kleinere Planeten („the hot Neptune desert“, MAZEH et al. 2016).

Führender Deutungsvorschlag für diese beiden Beobachtungen ist, dass Planeten der Neptunklasse ihre Gashüllen nahe am Stern nicht behalten. Die starke Strahlung der Sterne sorgt dafür, dass die Gashülle in den Weltraum abdampft

Parameterraum eingrenzt (TAMAYO et al. 2020). So kommen dann Aussagen zustande wie: „Die Planeten bewegen sich auf nahezu idealen Kreisbahnen, die Exzentrizität ist sehr gering.“ Solange keine gemessenen Daten vorliegen, sind diese Schlussfolgerungen hypothetisch. Die hier angewandte Vorgehensweise unterstellt ein hohes Alter der Planetensysteme. Wissenschaft-

Abb. 5 Mit der Transitmethode entdeckte Planeten, aufgetragen ist der Planetenradius über dem Abstand zum Stern (logarithmisch)



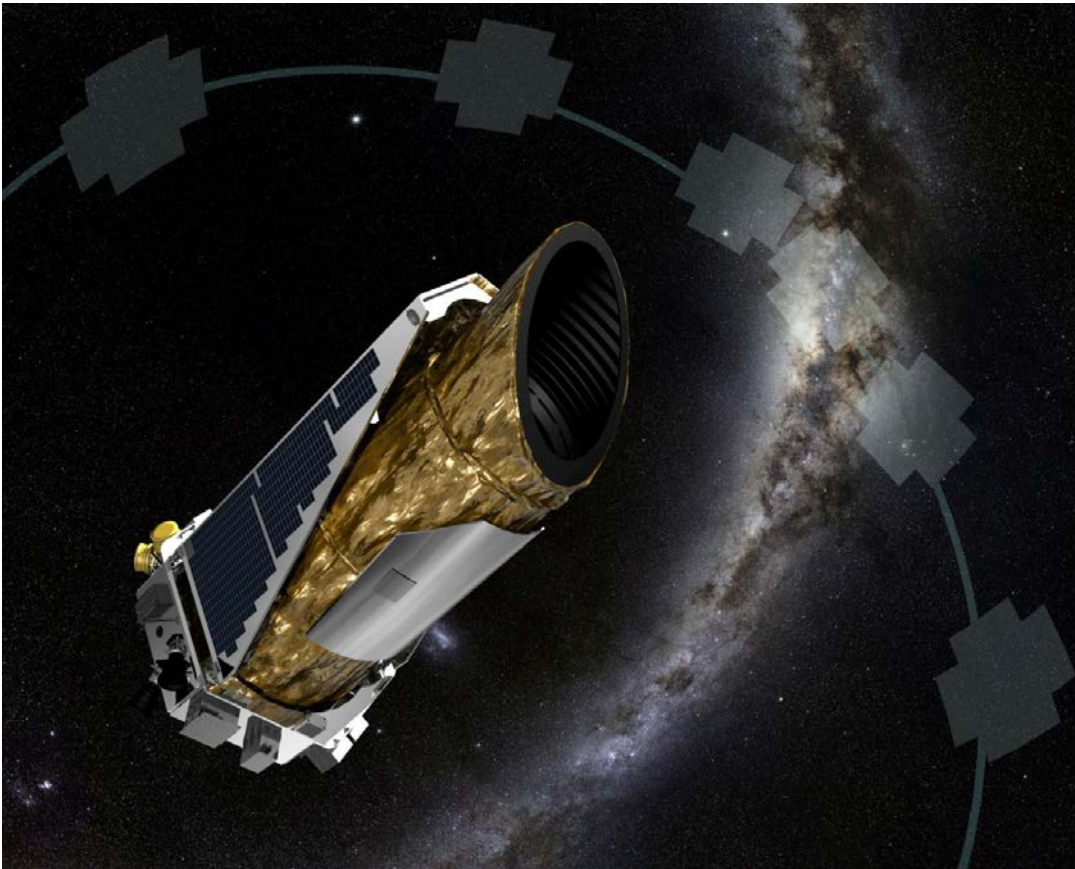


Abb. 6 Kepler-Weltraumteleskop, künstlerische Darstellung (NASA)

Quantitativ den größten Fortschritt erreichte man durch das Kepler-Weltraumteleskop, das tausende Planeten entdeckte.

(Photoevaporation). Es bleibt dann ein Gesteinsplanet ohne Gashölle übrig, also eine Super-Erde.

3. Sind mindestens drei Planeten in einem System, so sind diese meist von ähnlicher Größe und haben ähnliche Abstände voneinander. Vergleicht man benachbarte Planeten, so ist der äußere in zwei Drittel der Fälle größer als der innere. („Peas in a Pod“, WEISS et al. 2018). Diese Beschreibung trifft im Übrigen auch für die vier Gesteinsplaneten des Sonnensystems zu.

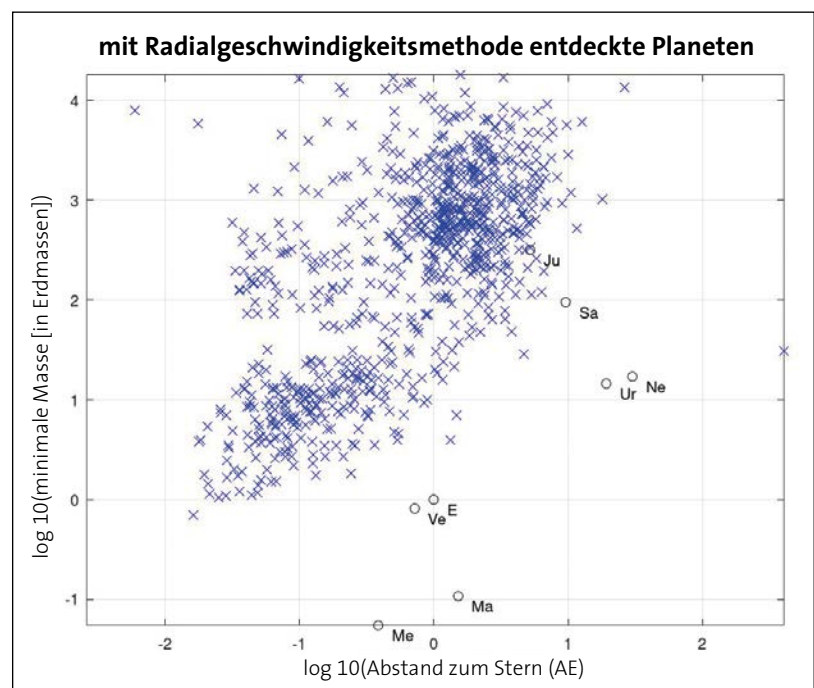
4. Je mehr chemische Elemente, die schwerer als Helium sind, ein Stern enthält, desto häufiger handelt es sich bei den Planeten um große Planeten, während bei kleineren Planeten diese Abhängigkeit wesentlich schwächer ist (PETIGURA et al. 2018). Diese Beobachtung passt zu der Hypothese, dass sich größere Körper bilden können, wenn mehr schwerere Elemente in der Gas- und Staubwolke vorhanden sind.

Zu diesem Ergebnis kamen auch Analysen der mit der Radialgeschwindigkeitsmethode gefundenen Planeten. Ein derartiger Zusammenhang ist nach dem Standardmodell der Stern- und Planetenentstehung zu erwarten: Beim Kollaps einer Gas- und Staubwolke bei der Stern- und Planetenentstehung gibt es einen Wettlauf zwischen der Ansammlung des um

den Stern befindlichen Materials zu Planeten und dem Wegblasen oder Aufsaugen von Gas und Staub durch den eben entstandenen Stern. Für die Bildung von Planetenkernen benötigt man schwerere Elemente; sind mehr von ihnen verfügbar, werden diese Kerne schnell genug groß, um das Wasserstoff- und Heliumgas an sich zu binden und zu Gasplaneten zu werden.

Bei der Analyse der durch die Radialgeschwindigkeitsmethode gefundenen Planeten (Abb. 7) ergaben sich folgende Resultate:

Abb. 7 Mit Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckte Planeten, aufgetragen ist die Planetenmasse über dem Abstand zum Stern (logarithmisch)



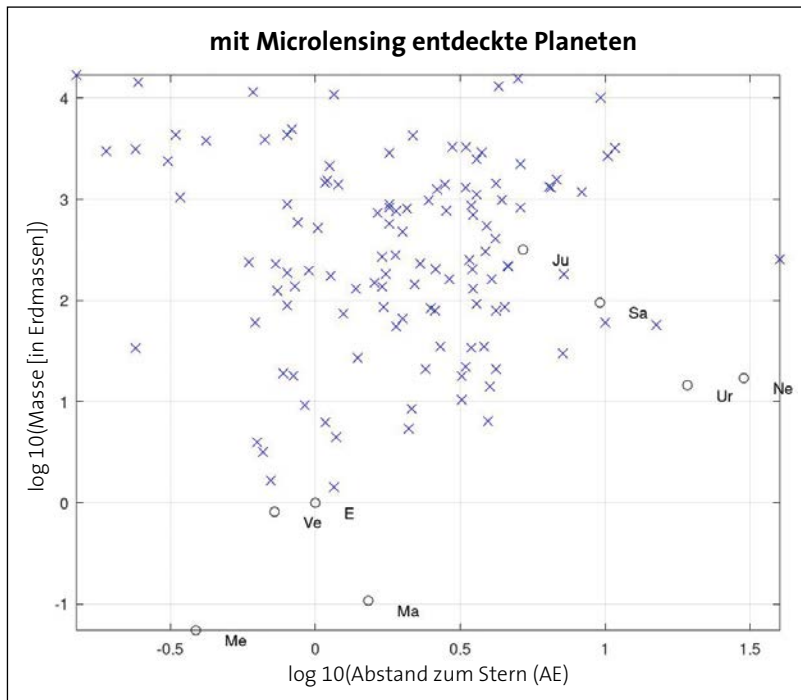


Abb. 8 Mit Microlensing gefundene Planeten, aufgetragen ist die Planetenmasse über dem Abstand zum Stern (logarithmisch)

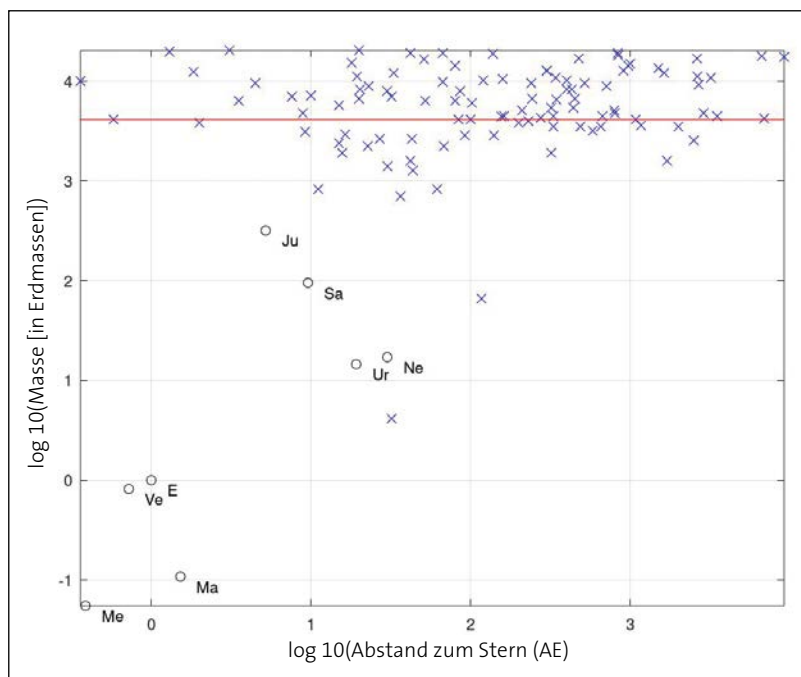


Abb. 9 Durch direkte Abbildung gefundene Planeten – oberhalb der roten Linie handelt es sich nicht mehr um Planeten im herkömmlichen Sinn, sondern um braune Zwerge*.

1. Bei sonnenähnlichen Sternen im Bereich kürzerer Umlaufdauern sind Super-Erden und Sub-Neptune etwa zehnmal häufiger als jupitergroße Planeten.

2. Gasriesen um sonnenähnliche Sterne haben am häufigsten Umlaufdauern von 5 Jahren (im Sonnensystem entspricht dies dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter), nach innen und außen nimmt die Häufigkeit jeweils ab. Diese Beobachtung passt zu der anhand der Architektur unseres Sonnensystems aufgestellten Hypothese, dass Gasriesen in Regionen entste-

hen, in denen während der Bildung des Systems Temperaturen herrschen, bei denen Wasser zu Eis kristallisiert und nicht nur als Dampf vorliegt. Da viel mehr Wassereis als Steinstaub in den Gas- und Staubwolken anzutreffen ist, würde dies die schnelle Bildung großer Planetenkerne begünstigen, die dann das Gas an sich binden würden.

Beim Microlensing (Abb. 8) ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit für Planeten am höchsten in einer Entfernung vom Stern, die jenseits der Eislinie liegt. Eine Analyse von 23 Planeten des MOA-II Microlensingprogramms ergab, dass Planeten eines Massenverhältnisses zum Stern wie Neptun zur Sonne jenseits der Eislinie am häufigsten sind (SUZUKI et al. 2016), d. h. sie sind häufiger als kleinere und größere Planeten. Dies stünde nicht im Widerspruch zu den Verhältnissen in unserem Sonnensystem, wo die beiden neptungroßen Planeten Uranus und Neptun den größeren Planeten Saturn und Jupiter gegenüberstehen.

Mit der direkten Abbildung (Abb. 9) kann man bis auf wenige Ausnahmen nur Planeten schwerer als eine Jupitermasse und weiter als 10 Astronomische Einheiten* vom Stern entfernt finden, die zudem relativ heiß sind. Durch hohe Oberflächentemperaturen strahlen sie hell genug, um gefunden zu werden, ohne vom Licht ihres Sterns überstrahlt zu werden. Solch hohe Temperaturen relativ weit entfernt vom Stern

Man kann derzeit noch nicht mit Sicherheit sagen, wie typisch oder untypisch unser Sonnensystem ist.

sind nur möglich, wenn sie eine andere Energiequelle haben als das Sternenlicht. Für Planeten mit einer Masse von weniger als 13 Jupitermassen wird dabei in der Regel davon ausgegangen, dass Materie auf sie einfällt und sich dabei aufheizt. Im Rahmen der Standardvorstellungen wird dies als eine der letzten Phasen der Planetenentstehung interpretiert.

Die meisten der mit der direkten Abbildung gefundenen Objekte sind keine Planeten, sondern Braune Zwerge. Diese Himmelskörper sind schwerer als 13 Jupitermassen, in ihrem Inneren findet, im Gegensatz zu Planeten, Kernfusion statt. Da aber nur Deuterium* fusioniert und dabei wesentlich weniger Energie als bei der Fusion von Wasserstoff freigesetzt wird, sind sie keine „vollwertigen“ Sterne.

Folgende Ergebnisse für Gasriesen liegen bisher vor:

1. Gasriesen jenseits 10–50 AE sind selten.
2. Gasriesen auf Bahnen >10 AE sind häufiger oder wenigstens gleich häufig bei größeren Sternen als bei kleineren anzutreffen (VIGAN 2020).

Obwohl die gefundenen Planetensysteme teils stark von unserem Sonnensystem abweichen, stellt sich heraus, dass die meisten Planetensysteme in den Rahmen der Standard-Entstehungstheorie passen.

Wie typisch ist unser Sonnensystem gemessen an den bisher beobachtbaren Eigenschaften?

Die mit den verschiedenen Methoden bisher entdeckten Planeten decken nur einen Teil der möglichen Planetengrößen und -umlaufbahnen ab. Betrachtet man die Grafik für Transitplaneten (Abb. 5), erkennt man, dass bisher keine entdeckt wurden, die in puncto Planetenradius und Abstand zum Stern einem Planeten des Sonnensystems entsprechen. Für die mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckten Planeten sind lediglich Exoplaneten mit ähnlicher Masse und ähnlichem Abstand wie Jupiter entdeckt worden. Auch bei Microlensing und Direktabbildung erfasst man Exo-Sonnensysteme, die unserem Sonnensystem entsprechen würden, bisher nicht. Die Ursache dafür ist, dass die Nachweismethoden bisher noch nicht genau genug sind und nicht lange genug eingesetzt werden konnten, um den leer erscheinenden Parameterraum abzudecken. Deshalb kann man derzeit noch nicht mit Sicherheit sagen, wie typisch oder untypisch unser Sonnensystem ist, was Planetengrößen und Umlaufbahnen betrifft. Allerdings weiß man, dass die Sonne ein gewöhnlicher Stern ist. Das schließt nicht aus, dass man trotzdem Hinweise auf Feinabstimmung finden kann. So gehört die Sonne im Vergleich zu Sternen ähnlicher Größe zu derjenigen Untergruppe, die relativ schwache und seltenere für das Leben schädliche Strahlungsausbrüche hat. Angesichts der Tatsache, dass man in den bisher untersuchten Parameterbereichen überall Planetensysteme gefunden hat, wäre es unerwartet, wenn unseres weit aus der Reihe fallen würde. Damit wäre aber noch nicht automatisch verknüpft, dass diese Systeme ähnlich gut feinabgestimmt für Leben wie unser Sonnensystem wären, weil dafür Details, die bisher für extrasolare Systeme nicht messbar sind, entscheidend sind.

Zusammenfassende Einschätzung

In den letzten Jahren konnten einige tausend Exoplaneten gefunden werden. Es kristallisiert

sich heraus, dass es eine Fülle verschiedener Arten von unerwarteten Planetensystemen gibt, darunter auch Extreme wie die „heißen Jupiter“. Daraus kann man jedoch nicht folgern, dass die Entstehungsmodelle von Planetensystemen aus Gas- und Staubwolken widerlegt seien. Die Mehrzahl der gefundenen Planetensysteme steht nicht im Widerspruch zu den grundsätzlichen Vorstellungen.

Ob unser Sonnensystem typisch ist, kann noch nicht gesagt werden, da in dem entsprechenden Bereich von Planetengrößen und Umlaufdauern noch kaum Daten aufgenommen werden konnten. Man kann die Prognose wagen, dass das Sonnensystem nicht exorbitant außergewöhnlich sein wird und damit der Stellung der Sonne unter den anderen Sternen folgen wird. Aber das wird sich zeigen müssen.

Literatur

- DAVID TJ et al. (2019) Four Newborn Planets Transiting the Young Solar Analog V1298 Tau, *The Astrophys. J. Lett.* 885, article id. L12, 10 pp.
- FULTON BJ & PETIGURA EA (2018) The California-Kepler Survey. VII. Precise Planet Radii Leveraging Gaia DR2 Reveal the Stellar Mass Dependence of the Planet Radius Gap. *Astron. J.* 156, 264; arXiv 1805.01453.
- GAUDI BS, CHRISTIANSEN JL & MEYER MR (2020) The Demographics of Exoplanets, Preprint arXiv: 2011.04703, To appear as a book chapter in „Exo-Frontiers: Big questions in exoplanetary science“, Ed. N MADHUSUDHAN (Bristol: IOP Publishing Ltd) AAS-IOP ebooks, <https://iopscience.iop.org/book-ListInfo/aas-iop-astronomy>.
- MAZEH T, HOLCZER T & FAIGLER S (2016) Dearth of short-period Neptunian exoplanets: A desert in period-mass and period-radius planes. *Astron. Astrophys.* 589, A75; arXiv 1602.07843.
- PETIGURA EA et al. (2018) The California-Kepler Survey. IV. Metal-rich Stars Host a Greater Diversity of Planets. *Astron. J.* 155, 89; arxiv: 1712.04042.
- SUZUKI D et al. (2016) The Exoplanet Mass-ratio Function from the MOA-II Survey: Discovery of a Break and Likely Peak at a Neptune Mass. *Astrophys. J.* 833, 145; arXiv 1612.03939.
- TAMAYO D et al. (2020) Predicting the long-term stability of compact multiplanet systems, arXiv: 2007.06521.
- THE EXTRASOLAR PLANETS ENCYCLOPAEDIA (2020). <http://exoplanet.eu>
- VIGAN A et al. (2020) The SPHERE infrared survey for exoplanets (SHINE). III. The demographics of young giant exoplanets below 300 au with SPHERE. arXiv:2007.06573, July 2020.
- WEISS LM et al. (2018) The California-Kepler Survey. V. Peas in a Pod: Planets in a Kepler Multi-planet System Are Similar in Size and Regularly Spaced. *Astron. J.* 155, 48; arXiv: 1808.03010

Anschrift des Verfassers:

*Albrecht Ehrmann, Gewandweg 22, 73432 Aalen,
E-Mail: albrecht.ehrmann@web.de*