

W I S wissenschaft
in die schulen!

Die sieben Welten von TRAPPIST-1

Ein massearmer roter Zwergstern im Sternbild Wassermann wird von sieben etwa erdgroßen Planeten umrundet. Drei von ihnen halten sich in der habitablen Zone ihres Zentralgestirns auf und könnten bei Vorhandensein einer Atmosphäre potenziell lebensfreundlich sein.

Von Tilmann Althaus

IN KÜRZE

- Den rund 40 Lichtjahre entfernten Roten Zwerg TRAPPIST-1 im Sternbild Wassermann umrunden sieben etwa erdgroße Planeten.
- Die Planeten TRAPPIST-1e, -1f und -1g befinden sich in der habitablen Zone ihres Zentralgestirns.
- Sollten diese drei Planeten über geeignete Atmosphären verfügen, so könnten sie potenziell lebensfreundlich sein.

Rund 40 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Wassermann befindet sich ein kühler roter Zwergstern mit der Bezeichnung TRAPPIST-1. Er ist ein ausgesprochen massearmer Vertreter seiner Art und erreicht nur etwa ein Zweitausendstel der Leuchtkraft unserer Sonne. Für sich betrachtet wäre der Stern ziemlich gewöhnlich, hätte nicht ein Forscherteam um Michaël Gillon an der belgischen Universität de Liège (Lüttich) sieben umlaufende Planeten entdeckt. Schon letztes Jahr wurde der Nachweis von drei Planeten bei TRAPPIST-1 bekanntgegeben (siehe SuW 9/2016, S. 10). Die Astronomen hatten in ihren Beobachtungsdaten allerdings Hinweise auf noch weitere Begleiter gefunden.

Die Planeten wurden mit der Transitmethode entdeckt: Sie ziehen von uns aus gesehen bei ihren Umläufen in regelmäßigen Abständen vor ihrem Zentralgestirn entlang und verdunkeln es dabei geringfügig. Um mehr über dieses System herauszufinden, beobachteten es die Forscher

drei Wochen lang annähernd kontinuierlich mit dem Weltraumteleskop Spitzer. Zudem nutzten sie während ihrer Beobachtungskampagnen den Infrarotspektrographen HAWK-I am Very Large Telescope der ESO in Chile und weitere Teleskope auf Hawaii, La Palma und in Südafrika, um ihre Messreihen zu komplettieren.

Die Bezeichnung TRAPPIST geht auf das »Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope« zurück (auf Deutsch etwa: Kleines Teleskop zum Nachweis der Durchgänge von Planeten und Planetesimalen). Die beiden 60-Zentimeter-Teleskope werden von der Universität de Liège betrieben und befinden sich auf dem Berg La Silla in Chile und in Marokko. TRAPPIST-1 war die erste Entdeckung von extrasolaren Planeten mit diesen Instrumenten.

Aus der Stärke der Verfinsterung bei den Durchgängen und dem aus Sternentwicklungsmodellen abgeleiteten Durchmesser des Zwergsterns lässt sich das Flächenverhältnis vom bedeckenden Objekt zum Zentralgestirn mit hoher Genauigkeit



AstroViews 4 – Exoplaneten
www.sterne-und-weltraum.de/
astroviews4



Im System um den roten Zwergstern TRAPPIST-1 tummeln sich sieben Planeten, die vor ihrem Zentralgestirn durchziehen. Sie weisen alle annähernd die Größe der Erde auf (künstlerische Darstellung).

ESO / N. Bartmann / spaceengine.org

ermitteln. Daraus kann in der Folge der Durchmesser des jeweiligen Planeten berechnet werden. Die Forscher stellten fest, dass fünf der sieben Planeten annähernd den Durchmesser der Erde aufweisen. Die beiden anderen sind deutlich kleiner und erreichen etwa den anderthalbfachen Durchmesser des Mars (siehe Bild S. 24 oben). Die Abstände zum Zentralgestirn betragen zwischen 0,011 und 0,063 Astronomische Einheiten (das 4,4- bis 24,5-fache der Entfernung Erde – Mond). Die Planeten benötigen für ihre Umläufe zwischen 1,5 und 20 Tage, ihre Jahre sind also sehr kurz (siehe Tabelle S. 27).

Ein Miniatur-Sonnensystem

Das System TRAPPIST-1 ist ausgesprochen kompakt und ließe sich bequem innerhalb der Umlaufbahn des sonnennächsten Planeten Merkur unterbringen. Der innerste Planet trägt die Bezeichnung TRAPPIST-1b. Die nächsten werden mit wachsendem Abstand zum Stern in alphabetischer Reihenfolge mit TRAPPIST-1c bis TRAPPIST-

1h bezeichnet. Beim äußersten Planeten TRAPPIST-1h bestehen noch große Unsicherheiten bei den Werten für den mittleren Abstand und die Umlaufperiode.

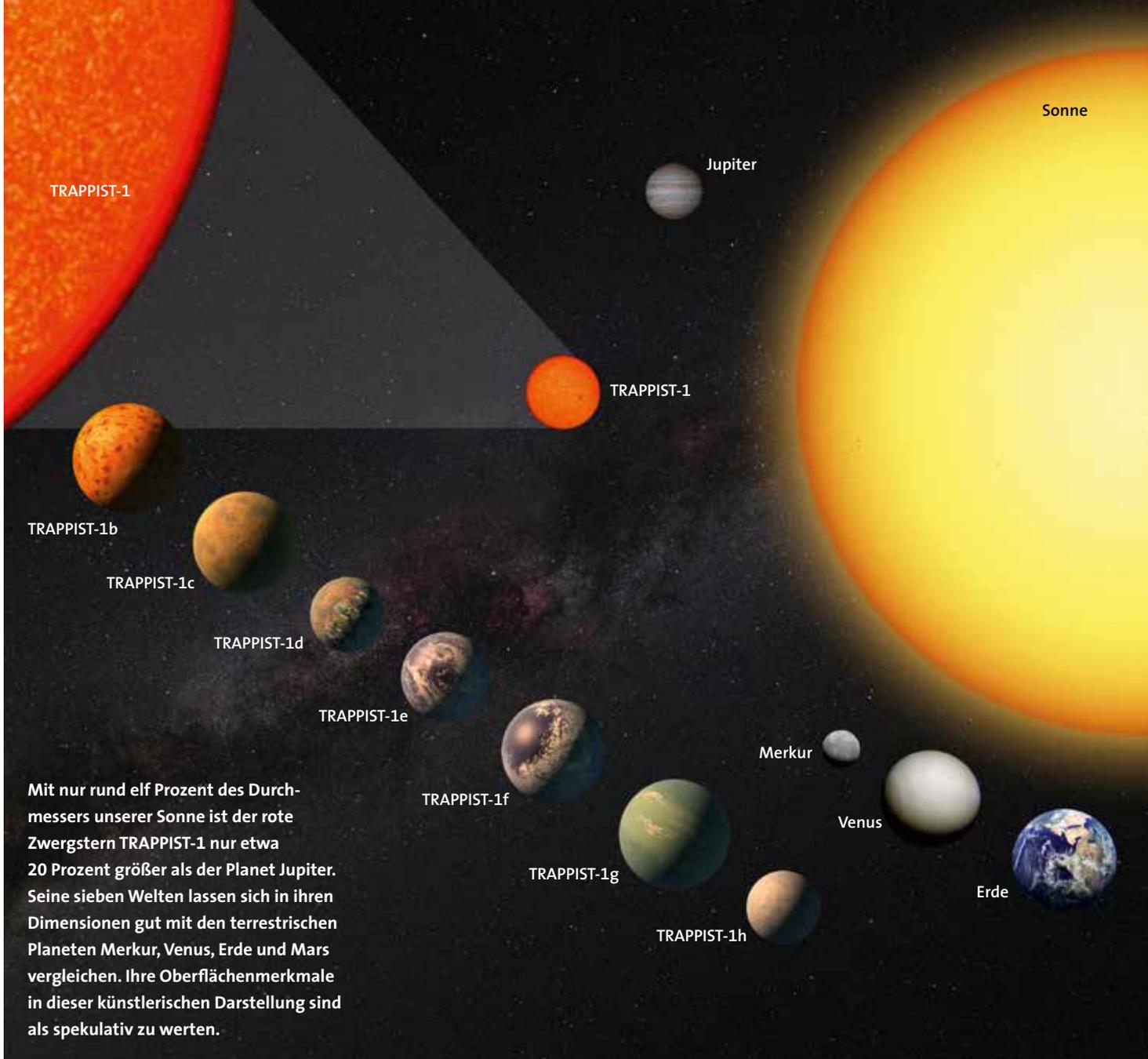
Das Planetensystem von TRAPPIST-1 ähnelt in seinen Dimensionen demjenigen von Jupiter mit seinen vier Galileischen Monden. Allerdings hat die noch nicht sicher bestimmte Umlaufbahn des am weitesten entfernten Planeten TRAPPIST-1h rund den fünffachen Radius der Umlaufbahn von Kallisto, dem äußersten Galileischen Mond (siehe Grafik S. 25 rechts). Und auch in einem weiteren

Aspekt erinnert TRAPPIST-1 an das Jupitersystem: Das Massenverhältnis der sieben Planeten zusammengenommen zu ihrem Stern ist annähernd das Gleiche wie dasjenige der Galileischen Monde zu Jupiter, nämlich etwa 1:5000.

Das Zentralgestirn des Systems TRAPPIST-1 hat einen nur um etwa 20 Prozent größeren Durchmesser als der Planet Jupiter. Seine Masse ist aber rund 80-mal so groß wie diejenige des Riesenplaneten. Damit befindet sich der Stern vom Spektraltyp M sehr nahe der unteren Massengrenze, an der im Innern die Fusion

Vergleich des Sterns TRAPPIST-1 mit der Sonne und Jupiter

Parameter	TRAPPIST-1	Sonne	Jupiter
Masse in Sonnenmassen	0,080	1	0,001
Radius in Sonnenradien	0,117	1	0,10
Durchmesser in Kilometer	163 000	1 390 000	142 700
mittlere Dichte in g/cm ³	71,5	1,41	1,33
Helligkeit in solaren Leuchtkräften	0,00052	1,00	–
effektive Temperatur in Grad Celsius	2290	5500	–



Mit nur rund elf Prozent des Durchmessers unserer Sonne ist der rote Zwergstern TRAPPIST-1 nur etwa 20 Prozent größer als der Planet Jupiter. Seine sieben Welten lassen sich in ihren Dimensionen gut mit den terrestrischen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars vergleichen. Ihre Oberflächenmerkmale in dieser künstlerischen Darstellung sind als spekulativ zu werten.

ESO / NASA / SuW-Graffik

von Wasserstoff zu Helium einsetzt. Dies ist die Energiequelle der meisten Sterne. TRAPPIST-1 ist somit ein ausgesprochen kleiner, massearmer und leuchtschwacher Zwergstern und erreicht eine Oberflächentemperatur von nur rund 2300 Grad Celsius (zum Vergleich: Unsere Sonne ist an ihrer Oberfläche im Mittel rund 5500 Grad Celsius heiß).

Die Forscher um Gillon untersuchten auch die Langzeitstabilität des Exoplanetensystems TRAPPIST-1: Ihre mit zwei unterschiedlichen Programmen durchgeführten numerischen Simulationen deuten an, dass es recht instabil ist. Innerhalb einer Milliarde Jahre besteht nach einer Simulation eine Wahrscheinlichkeit von 25 Prozent, dass das System instabil wird und Planeten verliert oder sogar manche seiner Welten miteinander kollidieren. Die Chance, dass das System länger als

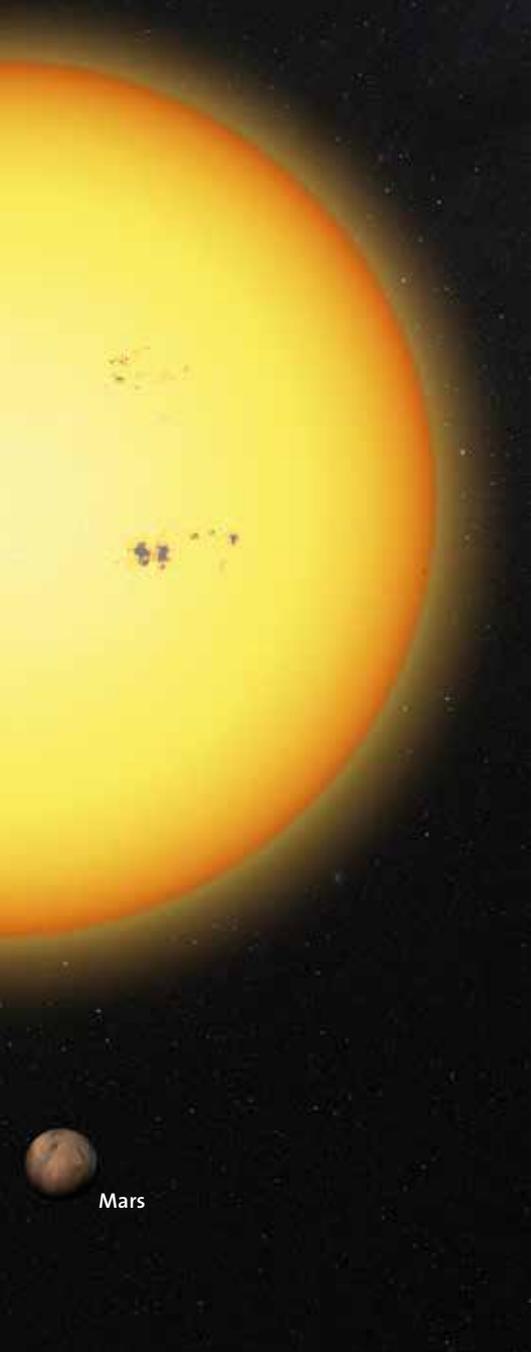
eine Milliarde Jahre hinweg stabil bleibt, liegt nach dem zweiten Simulationsprogramm bei nur etwa acht Prozent. Die Astronomen betonen jedoch, dass ihre Rechnungen nicht alle Aspekte des Systems berücksichtigen. So könnten die vom Stern ausgehenden Gezeitenkräfte das System durchaus auch über lange Zeiträume hinweg stabilisieren. Weitere, bislang unbekannte Planeten in noch größeren Entfernungen könnten mit ihren Schwerfeldern ebenfalls zur Stabilität beitragen.

Wie erdähnlich sind die Welten von TRAPPIST-1?

Durch die geringen Abstände der Umlaufbahnen kommt es bei den Planeten untereinander zu gravitativen Wechselwirkungen. Sechs von ihnen befinden sich annähernd in Resonanz, das heißt, die Längen ihrer Umlaufperioden stehen in

weitgehend ganzzahligen Verhältnissen zueinander, wie zum Beispiel 5:3, 3:2 oder 4:3. Damit ist TRAPPIST-1 das System mit den meisten Planeten, die miteinander in Resonanz stehen.

Dadurch, dass sich die Planeten wechselseitig anziehen, kommt es zu geringfügigen systematischen Veränderungen bei den Umläufen um ihren Stern. Das macht sich bemerkbar durch kleine Abweichungen bei den Zeiten, wann sie genau vor ihrem Zentralgestirn durchziehen. Diese Variationen betragen zwischen 2 und 30 Minuten gegenüber einem ungestörten Umlauf. Aus diesen Abweichungen (englisch: transit timing variations, TTV) lassen sich die Planetenmassen näherungsweise ermitteln, allerdings sind die Angaben mit großen Messfehlern behaftet (siehe Tabelle S. 27). Sie sind somit nur als Näherungswerte aufzufassen, erlauben



Mars

ESO / NASA / SuW-Grafik

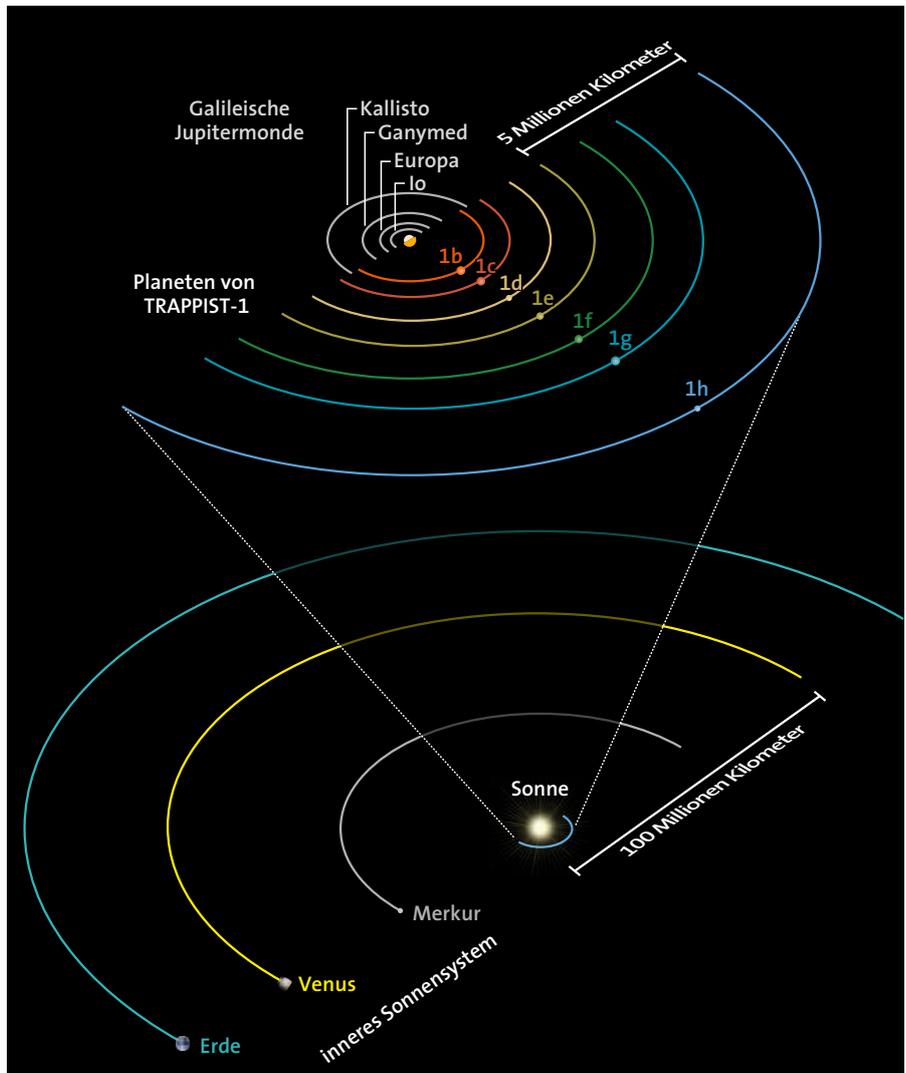


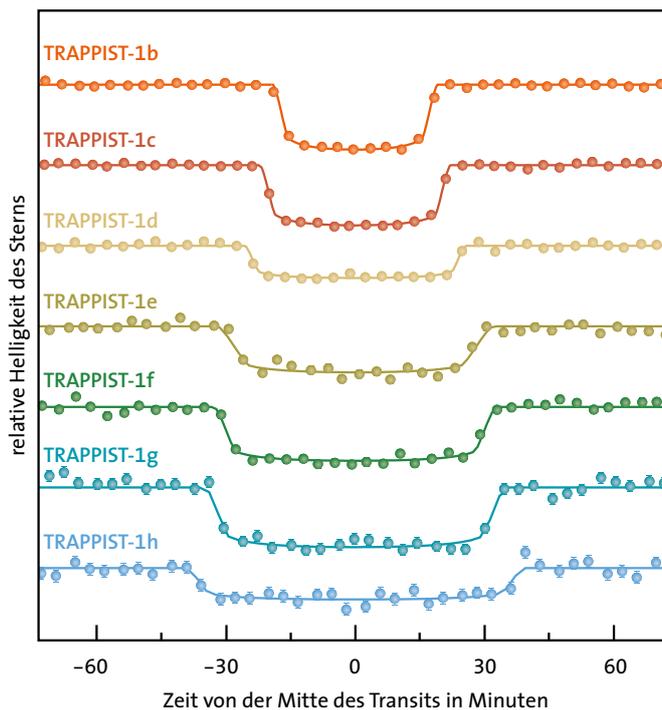
Illustration: Oliver Furtak / SuW-Grafik

Das Planetensystem von TRAPPIST-1 ist äußerst kompakt und seine Dimensionen ähneln demjenigen von Jupiter mit den vier Galileischen Monden (oben). Es ließe sich bequem innerhalb der Umlaufbahn des sonnennächsten Planeten Merkur platzieren.

aber die Charakterisierung der Exoplaneten und ihrer Eigenschaften.

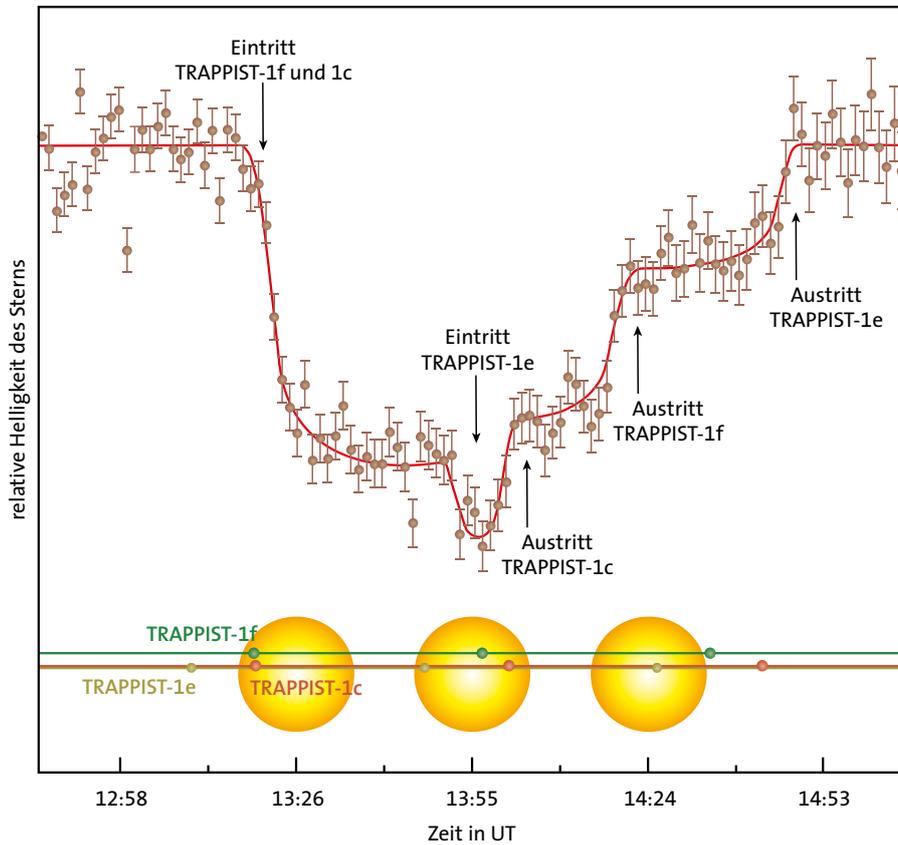
Mit den zuvor mit der Transitmethode bestimmten Durchmessern können die Forscher um Gillon aus den TTV-Daten Werte zwischen dem 0,4- und 1,4-fachen der Erdmasse ableiten. Die mittleren Dichten betragen dementsprechend zwischen 60 und 120 Prozent des irdischen Werts von 5,55 Gramm pro Kubikzentimeter. Es handelt sich somit nicht um Gasplaneten, sondern Gesteinswelten wie Merkur, Venus, Erde und Mars. Es ist daher wahrscheinlich, dass die meisten Planeten von TRAPPIST-1 erdähnlich aufgebaut sind: Sie gliedern sich in eine Kruste und einen Mantel aus Silikatgesteinen sowie einen Kern aus metallischem Eisen und Nickel.

Nach Ansicht von Michaël Gillon und seinen Koautoren ist es unwahrscheinlich, dass sich die Planeten von TRAPPIST-1



Alle sieben Planeten des Systems TRAPPIST-1 passieren bei ihren Umläufen regelmäßig die Scheibe ihres Zentralgestirns und verdunkeln es dabei um maximal etwa ein Prozent. Die farbigen Punkte und Kurven geben die Messwerte des Satelliten Spitzer wieder. Mit zunehmendem Abstand zum Stern dauern die Durchgänge länger, da ihn die Planeten langsamer umrunden.

ESO / Edward Janssen / SuW-Grafik



ESO / Edward Janssen / SuW-Grafik

Am 11. Dezember 2015 gelang den Astronomen mit Hilfe des Spektrografen HAWK-I am Very Large Telescope der ESO in Chile eine seltene Beobachtung: Sie verzeichneten den gleichzeitigen Durchgang von drei Planeten vor der Scheibe des Sterns TRAPPIST-1. Dabei überlagerten sich die Minima der Lichtkurven, wobei die Helligkeit des Zentralgestirns um bis zu zwei Prozent abfiel.

heute an den Orten befinden, wo sie sich erstmals bildeten. Sie entstanden in einer Scheibe aus Gas und Staub, die den Stern kurz nach dessen Entstehung umgab, und wanderten danach durch Reibung in der Scheibe immer weiter nach innen. Dieser Prozess endete, als sich die Scheibe nach wenigen Millionen Jahren durch starke Sternwinde auflöste. Durch die zuvor größeren Distanzen wären somit die Welten von TRAPPIST-1 aus Material entstanden, das reich an flüchtigen Stoffen wie Gasen und Wasser war. Daraus ließe sich folgern, dass sie alle von Atmosphären umgeben sein sollten. Haben sie allerdings keine, so wären die Planeten leblose, öde Kraterwüsten, auch wenn alle anderen Parameter gut mit der Erde übereinstimmen.

Die drei Planeten TRAPPIST-1e, -1f und -1g umrunden den Roten Zwerg in dessen habitabler Zone. Sie befinden sich somit in solchen Abständen, dass sich auf ihren Oberflächen je nach Beschaffenheit ihrer möglichen Atmosphären flüssiges Wasser halten könnte. Dagegen stehen die Planeten -1b, -1c und -1d ihrem Stern zu nahe und haben sich möglicherweise zu Gluthöhlen ähnlich der Venus entwickelt. Auf diesen Welten dürfte es bei Vorhandensein einer Atmosphäre zu einem galoppierenden Treibhauseffekt gekommen sein, so

Der ganze Kosmos. Auf Ihrem Bildschirm.



Das Digitalabo von **Sterne und Weltraum** kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). (Angebotspreise nur für Privatkunden)

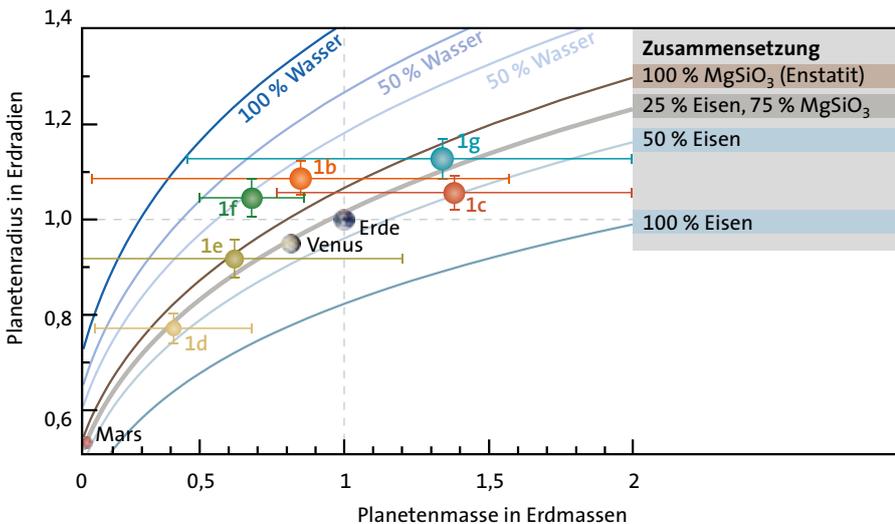
Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!
 service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
 www.sterne-und-weltraum.de/digitalabo



Die Planeten von TRAPPIST-1

Planet	TRAPPIST-1b	TRAPPIST-1c	TRAPPIST-1d	TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1f	TRAPPIST-1g	TRAPPIST-1h
Umlaufperiode in Tagen	1,51	2,42	4,05	6,10	9,21	12,35	≈ 20
Transitdauer in Minuten	36,4	42,4	49,1	57,2	62,6	68,4	≈ 76,7
Bahnneigung in Grad	89,7	89,7	89,8	89,9	89,7	89,7	89,8
Exzentrizität	< 0,081	< 0,083	< 0,070	< 0,085	< 0,063	< 0,061	?
Große Halbachse in AE	0,0111	0,0152	0,0214	0,0288	0,0371	0,0451	≈ 0,063
Mittlere Entfernung in Millionen Kilometer	1,66	2,27	3,21	4,30	5,55	6,74	≈ 9,4
Durchmesser (Erde = 1)	1,086	1,056	0,772	0,918	1,045	1,127	0,755
Masse (Erde = 1)	0,85 ± 0,72	1,38 ± 0,61	0,41 ± 0,27	0,62 ± 0,58	0,68 ± 0,18	1,34 ± 0,88	?
mittlere Dichte in g/cm ³	3,7 ± 3,1	7,7 ± 2,9	4,9 ± 3,3	4,4 ± 4,2	3,3 ± 0,9	5,2 ± 3,5	?

Die aus den Transit Timing Variations (TTV) abgeleiteten Massen und mittleren Dichten sind mit großen Unsicherheiten behaftet.



nach: Fig. 2 aus Gillon, M. et al., Nature 542, 2017 / SuW-Grafik

In diesem Diagramm wurden die Radien gegen die Massen der Welten von TRAPPIST-1 und den Planeten Mars, Venus und Erde aufgetragen. Die Kurven geben unterschiedliche Modellzusammensetzungen an. Bei einer Mischung aus 25 Prozent metallischem Eisen und 75 Prozent Magnesiumsilikat ergibt sich sowohl für Mars, Venus und Erde sowie die meisten Planeten von TRAPPIST-1 eine gute Übereinstimmung. Dies weist auf einen felsigen Charakter dieser Exoplaneten im Rahmen der Messgenauigkeit hin.

dass ihre Oberflächen mehrere hundert Grad Celsius heiß wären. Den äußersten Planeten TRAPPIST-1h erreicht dagegen nur etwa 13 Prozent des Energieflusses, den die Erde von der Sonne erhält. Berechnungen der Gleichgewichtstemperatur auf seiner Oberfläche ergeben im Mittel Werte um -105 Grad Celsius. Er dürfte somit eine Welt mit eisiger Oberfläche sein.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit rotieren alle Planeten von TRAPPIST-1 gebunden, das heißt, sie wenden ihrem Stern stets die gleiche Seite zu, so wie der Mond der Erde. Ihre Umlaufperioden dauern dann genau so lange wie ihre Rotationsperioden, was auf die starken Gezeitenkräfte in der Nähe zum Zentralgestirn zurückzuführen ist. Sie sorgen dafür, dass sich die Rotationsdauern durch Gezeitenreibung immer weiter erhöhen, bis sie schließlich gleich der Umlaufperiode sind. Auf allen Planeten scheint somit auf einer Hemisphäre ständig die Sonne und würde für einen hypothetischen Betrachter unverrückbar am Himmel stehen, während die andere Seite in ewige Dunkelheit gehüllt ist. Allerdings könnte eine geeignete Atmosphäre bei

den drei Planeten in der habitablen Zone dafür sorgen, dass es zu einem Temperaturengleichgewicht zwischen der Sonnen- und der Schattenseite kommt und somit überall bessere Bedingungen herrschen.

Wegen des relativ geringen Abstands von TRAPPIST-1 zu uns wird dieses System künftig zu einem der bevorzugten Objekte für die Erkundung durch Großteleskope der nächsten Generation gehören, wie etwa dem im Bau befindlichen European Extremely Large Telescope (E-ELT) mit seinem 39 Meter großen Hauptspiegel. Mit solchen Teleskopgiganten sollte es möglich sein, die Planeten direkt abzubilden und Spektren von ihnen zu gewinnen. Dann ließe sich endgültig feststellen, welchen Charakter diese Welten wirklich haben und ob sie tatsächlich lebensfreundlich sind.



TILMANN ALTHAUS ist seit 2002 Redakteur bei »Sterne und Weltraum« und betreut vor allem Themen zur Planetenforschung und Raumfahrt.

Literaturhinweise

Gillon, M. et al.: Seven Temperate Terrestrial Planets Around the Nearby Ultracool Dwarf Star TRAPPIST-1. In: Nature 542, S. 456–460, 2017, doi:10.1038/nature21360

Gillon, M. et al.: Temperate Earth-sized Planets Transiting a Nearby Ultracool Dwarf Star. In: Nature 533, S. 221–224, 2016, doi:10.1038/nature17448

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1439452

WIS Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1128724 und www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1156166



ESOcast zu TRAPPIST-1: <http://www.eso.org/public/germany/videos/eso1706a/>