



Günther Hasinger

Leibniz und die Planetenforschung

In: Grötschel, Martin u.a. (Hg.): Vision als Aufgabe : das Leibniz-Universum im 21. Jahrhundert. – ISBN: 978-3-939818-67-0. – Berlin: [2016], S. 211-225

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26326](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26326)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany (cc by-nc-sa 3.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Günther Hasinger

Leibniz und die Planetenforschung

1 Die Gravitationskraft

Gottfried Wilhelm Leibniz und Sir Isaac Newton waren Zeitgenossen, und sie waren Giganten ihrer Zeit. Auf unterschiedliche Weise beschäftigten sich beide mit dem Problem von Raum und Zeit und der Natur der Gravitationskraft und kamen dabei zu sehr unterschiedlichen Schlussfolgerungen. Dabei rieben sich insbesondere auch die Konzepte der klassischen Metaphysik und der modernen Physik aneinander. In einem hoch komplizierten Artikel stellte die belgische Philosophin Karin Verelst 2012 die beiden Protagonisten einander gegenüber unter dem Titel: „Newton gegen Leibniz: Intransparenz gegen Inkonsistenz“.

Sowohl Newton als auch Leibniz bauten auf den Vorarbeiten von Christiaan Huygens und René Descartes auf, der uns das Kartesische Koordinatensystem beschert hat. Danach bewegten sich die Himmelskörper (ebenso wie die Lichtwellen) in einem den ganzen Raum durchdringenden dünnen Medium, dem „Äther“. Im Rahmen von Descartes' Vortex-Theorie wurden die Planeten von den Partikeln des rotierenden Äthers quasi um die Sonne herumgeschoben. Ein rotierender Körper hat demnach die Tendenz, sich wegen seiner Trägheit entlang einer Tangente aus seiner gekrümmten Bahn zu bewegen, dies erzeugt die Zentrifugalkraft. Der Druck der umgebenden Flüssigkeit zwingt den Körper wieder auf seine gekrümmte Bahn zurück, das ist die Zentripetalkraft. Die auf die Planeten wirkende Kraft war demnach eine mechanische Wechselwirkung von Teilchen im lokalen Raum (wie der Stoß zwischen zwei Körpern) und hatte nicht unmittelbar etwas mit der Sonne zu tun.

In seiner unveröffentlichten Arbeit „De gravitatione et equipondio fluidorum“ versuchte Newton im Jahr 1685 zunächst noch, die Fluid-Hypothese von Descartes in eine solide ma-



Abbildung 1. Sir Isaac Newton (links) und Gottfried Wilhelm (von) Leibniz (rechts)

thematische Theorie zu fassen, was ihm aber nicht gelang (Hall und Hall 1962). Während er systematisch die von Descartes vorgeschlagenen Positionen untersuchte, entwickelte er seine eigenen Vorstellungen. Dies war vermutlich die Periode, in der ihm die berühmte Idee mit dem vom Baum fallenden Apfel kam: genauso wie der Apfel von der Erde angezogen wird und vom Baum fällt, fallen die Planeten um die Sonne herum. In dieser Arbeit taucht auch das erste Mal Newtons Vorstellung von einem absoluten und unveränderlichen Raum auf, die er 1687 in seinem Hauptwerk „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“ (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie) vollständig ausarbeitet. Demnach übt die Gravitationskraft in Newtons absoluten Inertialraum eine instantane, universelle Wirkung zwischen der Sonne und den Planeten aus. Die Stärke der Gravitationskraft nimmt dabei mit dem Quadrat des Abstandes der Körper ab. Newton konnte auf diese Weise die Kepler'schen Gesetze der Planetenmechanik aus seiner einzigen Kraft herleiten, stellte aber keinerlei Vermutung über die Herkunft der Gravitationskraft auf. Newton, der sich selbst als Naturphilosophen bezeichnete, lehnte die Einführung von Hypothesen strikt ab: „Hypotheses non fingo.“

Leibniz andererseits war einer der wichtigsten Philosophen und Universalgelehrten der Aufklärung, der auf sämtlichen Wissensgebieten seiner Zeit nicht nur bewandert war, sondern auch aktiv arbeitete. Er sagte über sich selbst: „Beim Erwachen hatte ich schon so viele Einfälle, dass der Tag nicht ausreichte, um sie niederzuschreiben.“ Gemäß seinem Motto „*theoria cum praxi*“ entwickelte er sowohl mathematische Methoden und philosophische Ansätze zur Metaphysik, als auch konkrete praktische Apparate. So stammen von ihm einerseits die Beschreibung des Dualsystems, die Entwicklung der Dezimalklassifikation, die Infinitesimalrechnung (Integralrechnung und Differentialrechnung und die Schemata zur Berechnung von Matrizen und Determinanten). Andererseits entwickelte er Pläne für ein Unterseeboot, verbesserte die Technik von Türschlössern, entwickelte ein Gerät zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit, erfand die Staffelwalze für eine mechanische Rechenmaschine und die Endloskette zur Erzförderung im Bergbau. Im Bereich der Lebenswissenschaften gab er den Ärzten den Ratschlag zur regelmäßigen Fiebermessung, gründete eine Witwen- und Waisenkasse und war einer der wesentlichen Begründer der modernen Sprachtheorie, insbesondere der Indogermanistik.¹ Wie oben eingeführt, beschäftigte sich Leibniz ebenfalls mit der Dynamik der Planetenbewegungen. Für den Praktiker Leibniz war die Vorstellung der von Newton postulierten, unmittelbar, also ohne Verzögerungen über große Entfernungen im Planetensystem, wirkenden universellen Gravitationskraft ein Gräuel. Aus seiner Umgebung warf man Newton deshalb „Okkultismus“ vor. Leibniz hielt weiterhin an Descartes' Vortex- und Fluid-Theorie fest, nach der die Planeten von lokalen mechanischen Kräften bewegt wurden. In seiner 1689 veröffentlichten Arbeit „*Tentamen de motuum coelestium causis*“ benötigt er zwei verschiedene Kräfte, um Keplers elliptische Planetenbahnen zu erklären, einerseits die „harmonische Zirkulation“, welche die Kreisbewegung der Planeten verursacht, andererseits den „Tangentenrückzug“, der die Elliptizität der Umlaufbahn verursacht. Leibniz wurde wegen dieser weit hergeholteten Hypothesen aus dem Newton'schen Lager Inkonsequenz vorgeworfen.

Letztendlich wurde der Konflikt zwischen Leibniz und Newton bezüglich der Gravitationskraft erst durch Einstein aufgelöst. Der „Äther“, in dem sich die Lichtwellen und die Planeten bewegen sollten, wurde bereits mit der Speziellen Relativitätstheorie hinweggefegt. Einstein zerstörte Newtons Idee vom absoluten Inertialraum und relativierte sowohl den Raum, als auch

die Zeit, abhängig von der Position des Betrachters. In den Jahren 1915 bis 1916 veröffentlichte Einstein die Grundlagen zur Allgemeinen Relativitätstheorie, nach der die von großen Massen bewirkte Krümmung des Raumes für die Gravitationskraft verantwortlich ist. Wie bei der elektromagnetischen Strahlung wird die Information über eine Änderung der Raumkrümmung mit Lichtgeschwindigkeit verbreitet. Wenn sich zum Beispiel wie in einem Doppelsternsystem zwei große Massen umeinander bewegen, senden sie Gravitationswellen aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum bewegen. Die Gravitationswellen waren die letzte Vorhersage von Einstein's Allgemeiner Relativitätstheorie, die fast genau 100 Jahre nach ihrer Einführung experimentell bestätigt wurde. Das Laser-Interferometer Gravitations-Observatorium LIGO entdeckte Ende 2015 die Gravitationswellen, die von der Vereinigung zweier Schwarzer Löcher mit etwa 30 Sonnenmassen herrührten.²

2 *Infinitesimalrechnung und die Entdeckung des Neptun*

Der zweite Streitpunkt zwischen Newton und Leibniz betrifft die Differential- und Integralrechnung, die von beiden unabhängig voneinander entwickelt wurde. Leibniz veröffentlichte 1684 seinen Formalismus zur Differential und Integralrechnung, mit dem wir alle in der Schule geplagt wurden. Er teilte dabei eine mathematische Kurve in unendlich kleine Teile, an die er Dreiecke anlegte und somit die Steigung bestimmte. Im Jahr 1687 folgte Newton mit seiner eigenen Methode der Differentialrechnung, die auf Flussröhren und Geschwindigkeitsveränderungen aufbaute. Beide Methoden führen zum gleichen Ergebnis, Leibniz' Notierung hat sich jedoch als weitaus eleganter und praktischer herausgestellt und ist heute der Standard in der Mathematik.

Anhänger Newtons haben später behauptet, Leibniz habe Newtons Ideen aus einem Briefwechsel von 1676 abgeschrieben.

Dies führte zu einer Plagiatsklage, die 1712 von einer Kommission der Royal Society of London untersucht wurde. Die Kommission, von Newton beeinflusst, sprach Leibniz fälschlicherweise schuldig. Dieser Streit belastete dann jahrzehntelang das Verhältnis zwischen englischen und kontinentalen Mathematikern. Heute gelten sowohl Newtons als auch Leibniz' Methode als unabhängig voneinander entwickelt.³

Jedenfalls ist die Differentialrechnung die Grundlage der modernen Wissenschaft und war auch für deren ersten großen Triumph verantwortlich: die Entdeckung des Planeten Neptun. Die fast wie ein Kriminalroman anmutende Geschichte von Neptuns Entdeckung habe ich ausführlich in meinem Buch „Schicksal des Universums“ beschrieben. Fast hat man das Gefühl, als hätte sich darin der Streit zwischen Newton und Leibniz mit teilweise nationalistischen Anwandlungen zwischen England und Kontinentaleuropa fortgesetzt. Im Folgenden gebe ich nur einen kurzen Abriss der Geschichte.

Die klassischen sieben „Planeten“ (Sonne, Mond, Mars, Merkur, Jupiter, Venus, und Saturn) waren bereits im Altertum bekannt und sind auf die sieben Tage der Woche abgebildet. Durch die kopernikanische Revolution wurde 1543 die Sonne in den Mittelpunkt gestellt, die Erde zum Planeten und der Mond zum Mond erklärt wurden. Galilei beobachtete 1613 einen bewegten

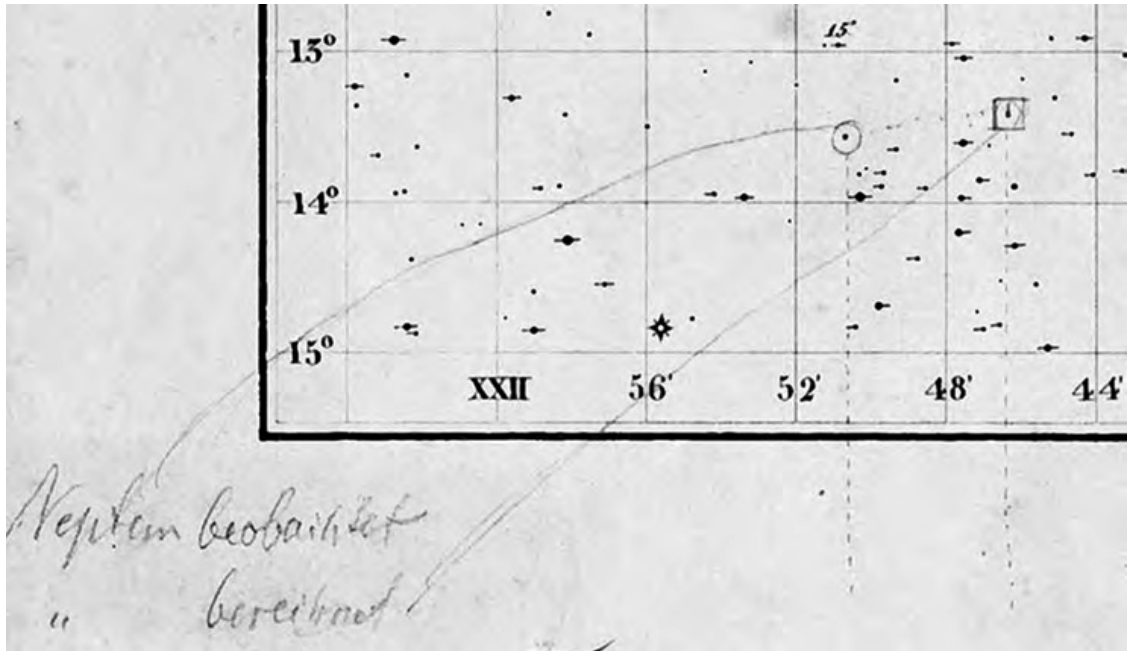


Abbildung 2. Ausschnitt aus der Sternkarte der Preußischen Akademie am Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam mit Johann Gottfried Galle's handschriftlichen Eintragungen

Lichtpunkt im Fernrohr, der sich 250 Jahre später als der achte Planet herausstellte. Wilhelm Herschel entdeckte 1781 bei der systematischen Durchmusterung des Himmels zufällig den siebten Planeten Uranus. Bei der Anwendung der Newton'schen Himmelsmechanik und Leibniz' Differentialrechnung auf die Bahn des Uranus entdeckte man zwischen 1825 und 1838 Unregelmäßigkeiten, die auf die Existenz eines weiteren möglichen Planeten hinwiesen. Im Jahr 1846 entdeckte Johann Gottfried Galle an der Sternwarte in Berlin den Planeten Neptun – innerhalb von kürzester Zeit und genau an der Stelle, wo er von dem französischen Mathematiker und Astronom Urbain Le Verrier in Paris mit Hilfe der Differentialrechnung vorhergesagt worden war: ein Triumph der modernen Wissenschaft! Das Ganze war eingebettet in eine Art Schlamm-schlacht zwischen englischen und kontinentaleuropäischen Wissenschaftlern, in der letztendlich die englischen Wissenschaftler einen erheblichen Mitanteil an der Entdeckung des Neptuns für sich beanspruchten. Erst über hundert Jahre später konnte man aus den zwischenzeitlich gestohlenen englischen Originalunterlagen nachvollziehen, dass die Ehre der Planetenentdeckung alleine Galle und Le Verrier zustand.

Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt der Sternkarte, mit deren Hilfe Galle und sein Doktorand Ludwig D'Arrest innerhalb von nur 45 Minuten an dem von Josef Fraunhofer gebauten Refraktor der Berliner Sternwarte den neuen Planeten entdeckten. Neben der präzisen mathematischen Vorhersage war die Existenz der von Dr. Bremmiker an der Preußischen Akademie der Wissenschaften (der Vorgängerin der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften) angefertigten exakten Sternkarte der Schlüssel zur Entdeckung des Neptun. Auf der Sternkarte, deren Original im Leibniz-Institut für Astronomie in Potsdam-Babelsberg liegt, hat Galle mit Bleistift verzeichnet: „Neptun beobachtet ... berechnet“.

3 *Pluto und der Neunte Planet*

Bereits kurz nach der Entdeckung Neptuns stellte Le Verrier die Vermutung eines trans-neptunischen Planeten (TNO) auf. Mehrere Teams machten unabhängig voneinander Vorhersagen, für die Position dieses „Planet-X“, die sich im Nachhinein alle als falsch herausstellten. Der reiche amerikanische Hobby-Astronom Percival Lowell baute extra ein eigenes Observatorium in Flagstaff, Arizona, und suchte Zeit seines Lebens erfolglos nach dem neunten Planeten. Der Nachtassistent des Observatoriums von Lowell führte dessen Arbeit fort und durchsuchte jahrelang hunderte von Fotoplatten. Im Jahr 1930 entdeckte er endlich einen schwachen, sich bewegendem Lichtpunkt. Das Objekt wurde mit großem Trara als der neunte Planet gefeiert, der erste, der von einem Amerikaner entdeckt wurde. Nach einem weltweiten Wettbewerb zur Namensgebung wurde der Name Pluto von einer 11-jährigen Schülerin aus England vorgeschlagen und mit Begeisterung aufgenommen. Walt Disney nannte umgehend seinen Zeichentrick-Hund nach ihm. Im Jahr 1978 wurde dann ebenfalls am Lowell Observatory der Pluto-Mond Charon entdeckt. Es bestanden aber von Anfang an erhebliche Zweifel, ob es sich bei Pluto um den lange gesuchten neunten Planeten des Sonnensystems handelt. Dennoch rüstete die NASA ein eigenes Raumschiff aus, um Pluto zu besuchen. Die Sonde ‚New Horizons‘ lieferte im Jahr 2015 spektakuläre Bilder von Pluto (Abb. 3).

Ende des 20. und Anfang des 21. Jahrhunderts wurden mit Hilfe von digitalen Kameras und Computer-Suchprogrammen eine ganze Reihe weiterer Trans-Neptunischer Objekte (TNO) entdeckt, die ähnlich groß oder sogar größer waren als Pluto. Insbesondere die Gruppe von Michael Brown am Caltech spielte dabei eine große Rolle. Bei ihrer Hauptversammlung in



Abbildung 3. ‚New Horizons‘ Aufnahme von Pluto

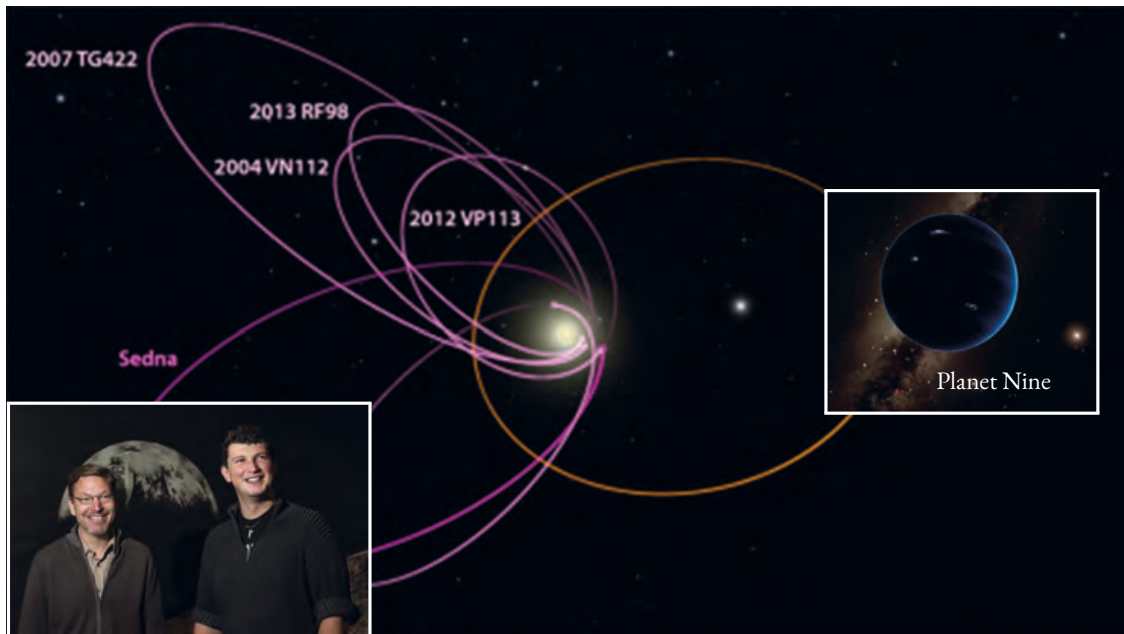


Abbildung 4. Michael Brown und Konstantin Batygin vom California Institute of Technology (Caltech) mit der von ihnen entdeckten Konstellation aus den Umlaufbahnen von sechs Zwergplaneten, die auf die Existenz eines wirklichen neunten Planeten im Sonnensystem hinweist.

Prag im Jahr 2006 stand die Internationale Astronomische Union vor dem Dilemma, entweder dem Sonnensystem eine ganze Reihe von kleinen Planeten hinzuzufügen, was die Bedeutung der klassischen Planeten deutlich geschmälert hätte, oder aber Pluto den Status als Planeten abzuerkennen. In einer dramatischen Serie von Abstimmungen, an denen ich als Vertreter Deutschlands teilnahm, wurde Pluto als Planet abgesetzt, aber gleichzeitig zum „König“ einer neuen Klasse von „Zwerg-Planeten“ ernannt.

2014 schlossen die amerikanischen Astronomen Chad Trujillo und Scott Sheppard aus der Ähnlichkeit der Bahn der TNOs Sedna und 2012VP₁₁₃ auf einen hypothetischen neunten Planeten. Pluto-Killer Mike Brown und Konstantin Batygin vom Caltech leiteten aus sechs ähnlichen TNO Orbits die Existenz eines Planeten etwa der Größe von Neptun ab. Dieser Riesenplanet soll eine bizarre, hoch-elliptische Umlaufbahn in den weiten Fernen des Sonnensystems haben, im Mittel etwa 20 Mal weiter entfernt als Neptun. Seine Umlaufperiode sollte etwa 10–20 000 Jahre betragen (siehe Abb. 4). Diese Theorien haben die Jagd nach Planet Neun erneut angeheizt. Sie wird insbesondere mit Teleskopen in Hawaii mit riesigen digitalen Kameras durchgeführt, mit den Pan-STARRS Teleskopen und dem Subaru-Teleskop.

Die gleichen Teleskope werden übrigens auch bei der Jagd nach Asteroiden eingesetzt, die in den letzten Jahren ebenfalls eine wichtigere Bedeutung erlangt haben. Im Jahr 1998 verfügte der US-Kongress, dass die NASA 90 Prozent aller erdnahen Objekte mit einem Durchmesser über einem Kilometer finden sollte, die eine Massenauslöschung verursachen könnten. Laut einer Pressemitteilung der NASA wurde dieses Ziel im September 2011 erreicht, nachdem mehr als 900 dieser Objekte entdeckt worden waren – übrigens keines von ihnen auf Kollisionskurs

mit der Erde. Im Jahr 2005 wurde jedoch das Mandat des Kongresses darauf erweitert, bis zum Jahr 2020 90 % aller gefährlichen Objekte mit Durchmessern bis zu 140 Meter oder mehr zu finden, und wir sind diesem Ziel bei Weitem noch nicht nahegekommen.

Die jüngste Aufregung wurde durch den Meteoriten verursacht, der am 15. Februar 2013 in der Atmosphäre über der russischen Stadt Tscheljabinsk explodierte. Der erdnahe Asteroid mit etwa 15–20 Metern Durchmesser explodierte in einer Höhe von etwa 30 Kilometern mit einer Energie von ca. 500 Kilotonnen TNT, etwa das 20–30-fache der Bombe von Hiroshima. Als solches war es das größte Objekt nach dem Tunguska-Ereignis, das 1908 in der Nähe des heutigen Krasnojarsk in Sibirien beobachtet wurde. Die in der Atmosphäre erzeugte Schockwelle zerstörte in der Stadt Tscheljabinsk viele Glasfenster und verursachte Verletzungen bei mehr als 1000 Menschen – zum Glück keine Todesopfer. Das Tscheljabinsk-Ereignis rüttelte die Politiker in den USA wieder auf, die daraufhin ihre finanzielle Unterstützung der Asteroidenforschung deutlich erhöhten.

Asteroiden sind aber auch aus anderen Gründen interessant. Letztendlich sind sie für den Aufbau der Erde in der Frühzeit des Sonnensystems verantwortlich und haben insbesondere die Bodenschätze und möglicherweise auch das Wasser auf die Erde gebracht. Die Tatsache, dass die wertvollen Bodenschätze, wie z. B. Gold- und Silberadern in der Erdkruste so ungleichmäßig verteilt sind, ist sehr wahrscheinlich auf einzelne Meteoriteneinschläge zurückzuführen. Einige für die Zukunft wichtige seltene Materialien wie zum Beispiel Tantal sind inzwischen auf der Erde rar geworden. Das hat findige Geschäftsleute auf die Idee gebracht, in Zukunft möglicherweise geeignete Asteroiden einzufangen und spezielle Bodenschätze auf ihnen zu fördern. Das Interesse der NASA hat sich ebenso den Asteroiden zugewandt. Sie hat ihr langfristiges Ziel, möglichst bald Menschen auf den Mars zu bringen, zugunsten der Landung auf einem Asteroiden, möglicherweise sogar des Einfangs eines Asteroiden hintangestellt. In diesem Zusammenhang ist eine Entdeckung interessant, die uns vor kurzem an der Universität von Hawaii mit dem Pan-STARRS Teleskop gelungen ist.⁴ Der Asteroid 1016 HO₃ hat sich als ein Objekt herausgestellt, das wie ein zweiter Mond unsere Erde umkreist. Der etwa 100 Meter große Körper befindet sich zwar auf einer Umlaufbahn um die Sonne, bleibt dabei aber der Erde immer so nahe, dass er sie wie ein Quasi-Mond umkreist. Dieser Asteroid könnte sich für die Zukunft noch wichtig erweisen, weil er unter den bekannten erdnahen Objekten dasjenige mit der kleinsten Geschwindigkeitsdifferenz ist, das also mit dem geringsten Aufwand erreichbar ist.

4 *Unzählig viele Welten*

Das Forschungsfeld der extrasolaren Planeten hat in den letzten beiden Jahrzehnten einen dramatischen Aufschwung erfahren. Inzwischen haben die Astronomen tatsächlich bereits etliche tausend Planeten außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt. Die Suche nach Anzeichen von Leben auf extrasolaren Planeten ist eines der faszinierendsten Forschungsziele, eine Art Heiliger Gral der Astronomie in den nächsten Jahrzehnten. Planeten um andere Sterne sind extrem schwer dingfest zu machen, weil aus großer Entfernung betrachtet ihr schwaches Licht vollständig vom Mutterstern überstrahlt wird und es damit nur in wenigen Ausnahmefällen möglich ist, die Planeten von ihrem Stern zu trennen und separat zu fotografieren. Es gibt jedoch eine

Reihe indirekter Methoden zur Planetenentdeckung, die hauptsächlich auf den Auswirkungen basieren, die der Planet auf seinen Mutterstern hat.

Die ersten Hoffnungen zur Entdeckung von Exoplaneten wurden geweckt, als Astronomen in den 1980er Jahren mit Hilfe von Infrarotbeobachtungen Staubscheiben um ansonsten ganz normale Sterne fanden. Der berühmt gewordene erste Fall einer derartigen Staubscheibe existiert um den Stern Beta Pictoris im Sternbild Maler. Diese Staubscheiben werden als die Wiegen von Planetensystemen angesehen. Die ersten Entdeckungen von extrasolaren Planeten wurden 1994 im Radiobereich gemacht, wo man einige Objekte der Größe von Planeten fand, die einen Pulsar, einen schnell rotierenden Neutronenstern umkreisen. Der wirkliche Durchbruch kam jedoch im Oktober 1995, als zwei Astronomen von der Universität Genf, Michel Mayor und Didier Queloz, mit Hilfe der relativ kleinen Teleskope des Observatoire de Haute Provence die erste definitive Entdeckung eines extrasolaren Planeten um den normalen Stern γ Pegasi machten. Parallel dazu haben Geoffrey Marcy und R. Paul Butler an den Lick- und Keck-Teleskopen ebenfalls extrasolare Planeten gefunden. Beide Teams verwendeten die so genannte „Doppler-Wobble“-Methode. Durch hochpräzise Spektroskopie misst dieses Verfahren die durch die Umlaufbewegung der Planeten verursachte extrem kleine Bewegung des zentralen Sterns. Jupiter, beispielsweise, umrundet die Sonne nur näherungsweise. Nach den Keplerschen Gesetzen kreisen beide Himmelskörper in Wirklichkeit um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Als Ergebnis tanzt die Sonne periodisch um den gemeinsamen Schwerpunkt, der sich noch innerhalb der Sonnenoberfläche befindet. Um die sehr kleine Radialgeschwindigkeit des Sterns von wenigen Metern pro Sekunde, also etwa Schrittgeschwindigkeit, zu messen, ist eine extrem genaue Geschwindigkeitsfalle notwendig. Wie bei den Radarfallen der Polizei funktioniert dies mit Hilfe des Doppler-Effekts, das heißt der Verschiebung der Spektrallinien im Spektrum des Sterns. Mit Hilfe von Keplers Gesetzen kann dieses „Doppler-Wobble“ oder „Radialgeschwindigkeits-Verfahren“ aus der Umlaufbahn die Masse des Planeten bestimmen.

Im folgenden Jahrzehnt gab es eine Welle von neuen Entdeckungen in diesem Bereich, teilweise angetrieben durch den Bau von neuen, speziell dafür entwickelten bodengebundenen Instrumenten und besser ausgereiften Technologien, wie die adaptive Optik, die direkte Abbildungen einiger Planeten in speziellen Konfigurationen erlaubte, durch bessere Spektrographen, bessere Detektoren und leistungsfähigere Computer-Algorithmen. Im Juli 2016 listet die „Enzyklopädie der Extrasolaren Planeten“ 3473 entdeckte Exoplaneten in 2598 Planetensystemen auf, davon 589 mit mehreren Planeten in einem System.⁵

Der sprunghafte Anstieg der Entdeckung von Exoplaneten in den letzten zehn Jahren ist der Einführung einer neuen indirekten Entdeckungsmethode zu verdanken. Wenn wir Glück haben, sehen wir die Ebene, in welcher der Planet seinen Mutterstern umkreist, von der Kante, so dass der Begleiter regelmäßig vor seinem Stern vorbeizieht. Dieses Phänomen bezeichnet man als „Transit“. Am 5. Juni 2012 versammelte sich in einer vom Institut für Astronomie der Universität von Hawaii organisierten Veranstaltung eine große Menge von Zuschauern am Strand von Waikiki in Honolulu, um den Durchgang der Venus vor der Sonne zu beobachten, ein Schauspiel das nur etwa alle 115 Jahre auftritt, jeweils in Paaren in acht Jahren Abstand. Es war faszinierend zu sehen – zusammen mit 15 000 Zuschauern am Waikiki Beach – wie sich der kleine „Schönheits-Fleck“ der Venus im Verlauf von $6\frac{1}{2}$ Stunden über das Gesicht der Sonne bewegte. Der Transit eines Exoplaneten ist ein ähnlich seltenes Phänomen, weil man das ferne

Planetensystem fast genau von der Kante sehen muss. Im Falle eines erdähnlichen Planeten um einen sonnenähnlichen Stern ist die Wahrscheinlichkeit, einen Durchgang zu erhaschen nur etwa 0,5 %. Im Falle eines Planeten der Größe von Jupiter, der sehr nahe um seinen Stern kreist, kann die Wahrscheinlichkeit auf etwa 10 % steigen. Wenn der Planet vor seinem Mutterstern steht, wird eine geringe Menge des Sternenlichtes abgeschattet, so dass seine Helligkeit ein klein wenig abfällt. Mit modernen Detektoren und einer sehr stabilen Beobachtungsplattform kann diese sehr geringe Reduktion gemessen werden, und wenn man lange genug beobachtet, sollte man sehen, wie sich das Signal periodisch wiederholt. Im Jahr 1999 kündigte die Gruppe von Michel Mayor die erste Entdeckung des Transits eines Exoplaneten an, die sie mit einem kleinen 10 cm-Teleskop gemacht hatten, das mit einem modernen CCD-Detektor ausgestattet war. Der Planet HD 209458b war ursprünglich mit der Doppler-Wobble-Methode entdeckt worden, aber die beobachteten Transitsignale haben ohne jeden Zweifel die Existenz des Planeten bestätigt und eröffneten einen neuen Weg für die Entdeckung von Exoplaneten.

Der Durchbruch auf dem Gebiet der Planeten-Transits kam mit speziellen Weltraumbeobachtungen. Die französische Raumfahrtbehörde CNES startete im Jahr 2006 den CoRoT-Satelliten, die erste Weltraummission, die speziell zur Entdeckung von Exoplaneten konzipiert war. Mit seinem 27 cm-Teleskop hat CoRoT in der Tat die ersten Exoplaneten mit Hilfe von Transits entdeckt. Im Jahr 2009 startete die NASA ihre erste Exoplaneten-Mission ‚Kepler‘. Der Satellit trägt ein einziges Instrument mit einem 95 cm-Teleskop und 42 CCDs in der Fokalebene, die ein riesiges Gesichtsfeld von etwa 12 Grad Durchmesser bedecken. Über mehr als vier Jahre startete ‚Kepler‘ kontinuierlich auf ein Himmelsfeld im Sternbild des Schwan, wo er gleichzeitig die Helligkeit von mehr als 150 000 Sternen gemessen hat und alle 30 Minuten extrem genaue photometrische Messungen aufnahm. Im Mai 2013 verlor der Kepler-Satellit leider das zweite seiner vier Reaktionsräder und konnte daher seine nominale Mission nicht fortsetzen. Inzwischen haben die Wissenschaftler und Ingenieure der NASA zusammen mit der Firma, die den Satelliten ursprünglich gebaut hatte, einen hochkomplizierten neuen Betriebsmodus für ‚Kepler‘ entwickelt, der unter dem Namen „K2“ die Beobachtungen der Exoplaneten fortsetzen konnte. Tatsächlich hat unser Institut vor kurzem eine Presseerklärung herausgegeben, in der die ersten einhundert mit K2 entdeckten Exoplaneten angekündigt wurden.⁶

Die Statistik der Entdeckung von Exoplaneten ergab mehrere Überraschungen. Die Radialgeschwindigkeitsmethode ist am empfindlichsten für große, jupiter-ähnliche Planeten, die sehr nahe um ihren Mutterstern kreisen. Tatsächlich sind die Statistiken der ursprünglich mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckten Exoplaneten von Objekten von Jupiter-Größe und größer dominiert. Überraschenderweise war die typische Geometrie der entdeckten Planetensysteme völlig verschieden von unserem eigenen Sonnensystem, mit größeren Planeten viel näher an ihrem Mutterstern. Die extremsten Fälle sind so genannte „heiße Jupiter“, große Gasplaneten, die ihren Stern näher umkreisen als Merkur die Sonne. In so einem heißen Jupiter erreicht die seinem Stern zugewandte Seite Temperaturen vergleichbar mit der Sternoberfläche, während die dem Stern abgewandte Seite viel kälter ist – was ein teuflisches Klima verursacht. Obwohl die Statistik der Entdeckungen offensichtlich durch Selektionseffekte verfälscht wird, hat die Tatsache, dass große Planeten so nahe an ihren Zentralsternen gefunden wurden, viele neue theoretische Arbeiten über die Entwicklung von Planetensystemen ausgelöst, einschließlich unseres eigenen Sonnensystems. Tatsächlich wird die Wanderung großer Planeten von den äußeren Bereichen

bis in die Nähe ihres Zentralgestirns inzwischen als ein wichtiger Bestandteil in der Entstehung und Entwicklung der Planetensysteme angesehen. Dieser Prozess könnte unter Umständen eine wichtige Rolle beim Transport von Wasser aus den äußeren, kalten Bereichen des entstehenden Planetensystems in das Innere der Planetenscheibe spielen⁷.

Aus der Statistik der Exoplaneten und ihrer Muttersterne können weitere wichtige Aussagen abgeleitet werden. Zumindest die Jupiter-ähnlichen Gasriesen scheinen nur um Sterne zu existieren, die wie die Sonne bereits einen großen Anteil an den im Rahmen der kosmischen chemischen Entwicklung gebildeten schweren Elementen in ihren Atmosphären haben. Kleinere Planeten wurden dagegen auch um chemisch relativ junge Sterne entdeckt, die nach dem Urknall aus fast jungfräulichem Gas mit einem sehr niedrigen Gehalt an schweren Elementen gebildet wurden.

5 *Exoplaneten-Entdeckungen in Hawaii*

In den letzten Jahren haben sich die Universität von Hawaii in Manoa und insbesondere das Institut für Astronomie (IfA) bei der Entdeckung und Untersuchung von Exoplaneten zu wohl einem der weltweit aktivsten Exzellenzzentren entwickelt. Als Direktor hatte ich die Freude und Ehre, diese Entwicklung zu begleiten. Eine sehr aktive junge Gruppe von Dozenten, Post-Docs und Doktoranden trägt das Feld vorwärts, und ich möchte hier einige ihrer jüngsten Entdeckungen darstellen.

Adam Kraus, ein ehemaliger Post-Doc des IfA, hat zusammen mit seinem Kollegen Michael Ireland, das erste direkte Bild eines „Baby-Planeten“ im Prozess der Entstehung um seinen Stern eingefangen. Das Objekt LkCa 15b sieht aus wie ein heißer „Protoplanet“ der von einer Wolke aus kühlerem Staub und Gas umgeben ist, das auf den sich noch bildenden Planeten fällt. Mit einem Alter von nur zwei Millionen Jahren ist dies der jüngste jemals entdeckte Planet; er sitzt in einer großen Lücke zwischen dem jungen Mutterstern und einer äußeren Scheibe aus Staub (siehe Abb. 5). Die beiden Astronomen kombinierten die Leistung der adaptiven Optik des 10-Meter-Keck-Teleskops, welche die Luftturbulenz über Maunakea korrigiert, mit der klassischen Technik der Aperturmaskeninterferometrie, bei der eine kleine Maske mit mehreren Löchern in den optischen Pfad gebracht und durch das Riesenteleskop fokussiert wird. Auf diese Weise konnten sie den bisher schärfsten Kontrast in den Aufnahmen erreichen und so die Lücken in den protoplanetaren Scheiben um junge Sterne auflösen, um zu sehen, wo sich neu bildende Planeten im Staub verstecken könnten.⁸

Mit den Planeten-Transit-Daten der NASA-Mission „Kepler“ hat ein anderes Team von Astronomen, unter anderem mit Nader Haghighipour vom IfA, ein System entdeckt, wo zwei Planeten um zwei Sterne kreisen – ein Double-Double. Dieses System mit der Bezeichnung Kepler-47 ist dem legendären Planeten Tatooine im Star Wars Universum ähnlich – der Heimat von Luke Skywalker. Inzwischen wurden bereits mehr als zehn ähnliche Planetensysteme entdeckt. Diese Ergebnisse zeigen, dass komplette Planetensysteme um Doppelsterne existieren können.⁹

Ein internationales Team von Astronomen unter der Leitung von Michael Liu und Eugene Magnier vom IfA hat einen exotischen, frei fliegenden Planeten entdeckt, der keinen Stern

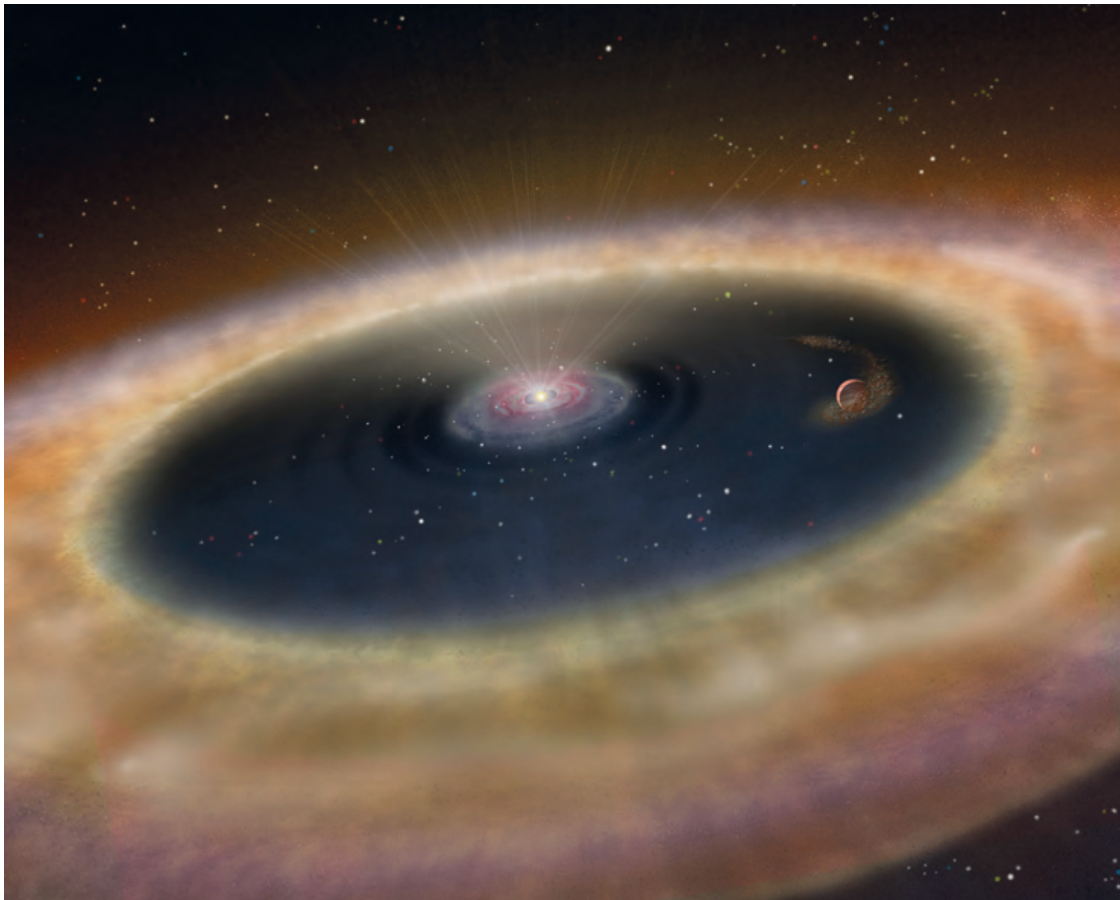


Abbildung 5. Künstlerische Darstellung der protoplanetaren Scheibe um den Stern LkCa 15. Der „Baby-Planet“ LkCa15b sammelt immer noch Material aus seiner Wiege aus Gas und Staub auf. (Karen Teramura, UH Institute for Astronomy)

umkreist. Das Objekt mit dem Namen PSO J318.5-22 ist nur 80 Lichtjahre von der Erde entfernt und hat eine Masse von etwa sechs Jupiter-Massen, sowie ein Alter von nur 12 Millionen Jahren. Mit Hilfe des Pan-STARRS 1 (PS1) Teleskops identifizierten sie dieses einzigartige Objekt anhand seines schwachen und seltsam gefärbten Lichtes und verwendeten dann andere Teleskope in Hawaii, um zu zeigen, dass es Eigenschaften ähnlich denen anderer Gasriesenplaneten hat, die um junge Sterne kreisen. Aber der „Lonely Planet“ PSO J318.5-22 ist ganz allein, ohne einen Mutterstern. Wie ein solcher Planet gebildet werden könnte, ist immer noch eine ungelöste Frage. Basierend auf seinem Abstand und seiner Bewegung durch den Raum hat das Team festgestellt, dass PSO J318.5-22 zu einer Ansammlung junger Sterne gehört, die sich zusammen mit dem berühmten Stern Beta Pictoris gemeinsam durch die Milchstraße bewegt und vor etwa 12 Millionen Jahren entstanden ist.¹⁰

Ein von Andrew Howard am IfA geführtes Team von Astronomen hat den ersten erdgroßen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt, der eine felsige Zusammensetzung wie die Erde hat.¹¹ Dieser Exoplanet mit der Bezeichnung Kepler-78b umkreist seinen Stern alle 8,5 Stunden auf einer sehr engen Umlaufbahn und ist daher viel zu heiß, um die Existenz von

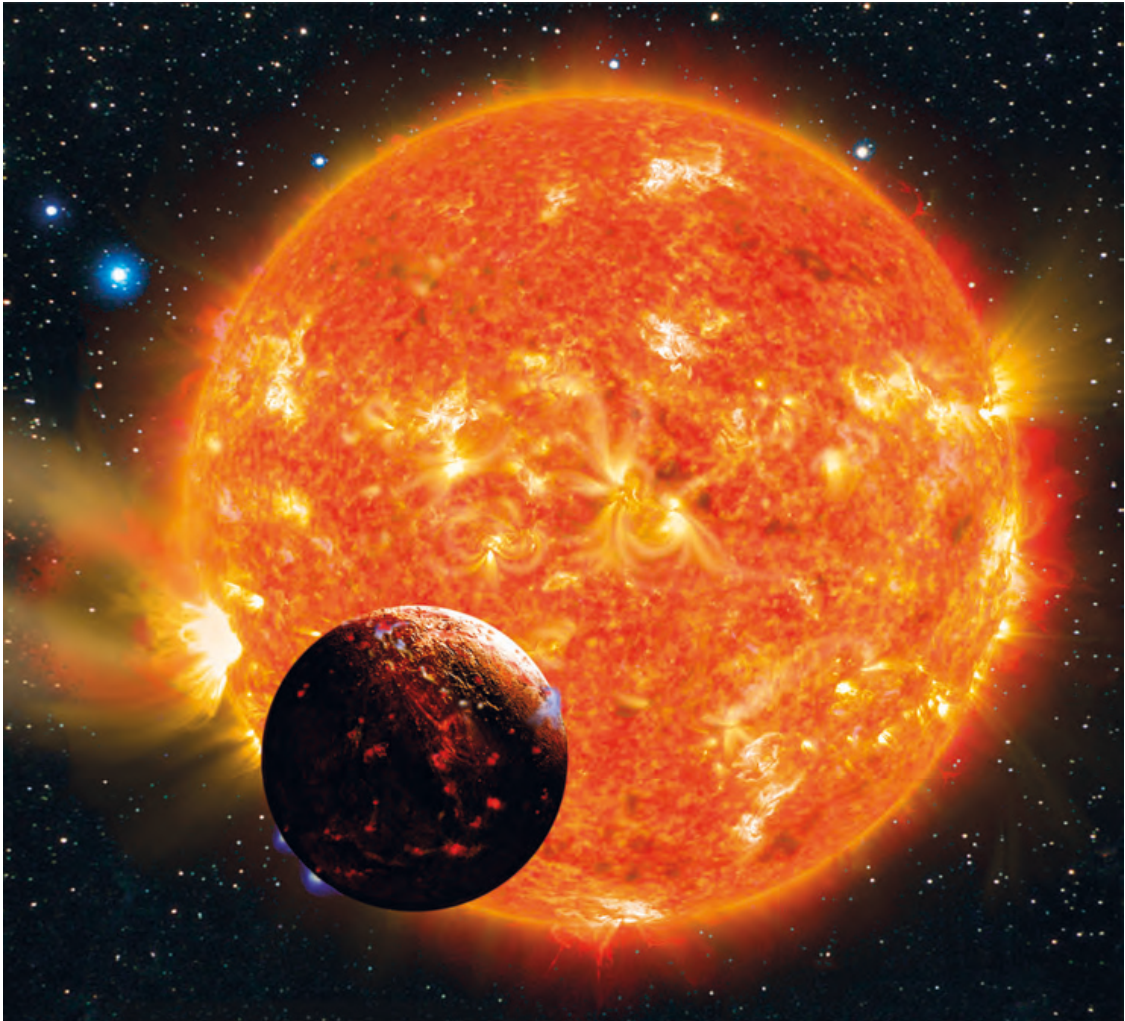


Abbildung 6. Künstlerische Darstellung des „Lava-Planeten“ Kepler 78b (Karen Teramura, UH Institute for Astronomy)

Leben zu ermöglichen. Nach der Entdeckung der typischen Planetentransits in den Kepler-Daten, konnten sie mit Hilfe hochauflösender Spektroskopie mit dem Keck-Teleskop die Masse des Planeten messen. Bereits zuvor war eine Handvoll von Planeten mit entweder der Größe oder der Masse der Erde entdeckt worden, aber dies ist der erste erdähnliche Planet, bei dem sowohl die Masse als auch die Größe bekannt ist, so dass die Astronomen die Dichte messen und damit beweisen konnten, dass der Planet, wie die Erde, in erster Linie aus Stein und Eisen besteht. Eine unabhängige Studie von der Genfer Sternwarte bestätigte diese Ergebnisse. Der Mutterstern von Kepler-78b ist etwas kleiner und weniger massereich als die Sonne und etwa 400 Lichtjahre entfernt. Wie dem auch sei, es würde sich wahrscheinlich nicht lohnen, dorthin zu reisen, weil die Temperatur auf diesem Planeten höllisch heiß sein muss, so dass seine Gesteinsoberfläche höchstwahrscheinlich aus geschmolzener Lava besteht (siehe Abb. 6).

Obwohl der Kepler-Satellit ja nun teilweise gelähmt ist und einem neuen Betriebsmodus unterliegt, hat er sein Haupt-Ziel erreicht, nämlich zu bestimmen, welcher Anteil der Sterne in

unserer Milchstraße potenziell bewohnbare Planet hat. Zusammen mit Andrew Howard vom IfA und dem Exoplaneten Pionier Geoffrey Marcy von der UC Berkeley hat der Doktorand Eric Petigura von der Universität Berkeley, der für ein Jahr am IfA zu Besuch war, die Statistik aller Kepler-Entdeckungen analysiert. Er kam zu dem grundlegenden Schluss, dass rund ein Fünftel aller sonnenähnlichen Sterne in der Milchstraße über Planeten verfügen, die ungefähr so groß wie die Erde sind und deren Temperatur flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche und damit möglicherweise auch Leben ermöglichen würde.¹²

Diese erstaunliche Erkenntnis bedeutet, dass, wenn man sich die Tausende von Sternen am Nachthimmel anschaut, der nächste sonnenähnliche Stern mit einem erdähnlichen Planeten in seiner bewohnbaren Zone wahrscheinlich nur etwa zwölf Lichtjahre entfernt ist und mit dem bloßem Auge gesehen werden kann. Dieses Ergebnis wurde im Jahr 2014 in den *Proceedings der US National Academy of Sciences* veröffentlicht, und die Autoren wurden mit dem renommierten Cozzarelli-Preis der Akademie ausgezeichnet.

6 *Der heilige Gral: Eine zweite Erde*

Wir wissen also inzwischen, dass erdähnliche Planeten in der bewohnbaren Zone um sonnenähnliche Sterne in unserer Milchstraße relativ häufig vorkommen. Zumindest in astronomischen Maßstäben sollte das uns am nächsten gelegene Objekt, eine zweite Erde, direkt vor unserer kosmischen Haustüre liegen, in einer Entfernung von etwa 12 Lichtjahren, also gerade mal drei Mal weiter als der uns am nächsten gelegene Stern Proxima Centauri. Von dieser Erkenntnis bis zur Entdeckung und genaueren Untersuchung einer zweiten Erde ist es aber noch ein sehr langer Weg. In den nächsten Jahren und Jahrzehnten werden unsere Werkzeuge dazu deutlich geschärft werden. Wir benötigen wesentlich längere und deutlich empfindlichere Zeitreihen, um eine zweite Erde mit den klassischen Methoden zu entdecken. Neue, speziell für die Entdeckung von Planetentransits optimierte Weltraumobservatorien werden derzeit entwickelt: der TESS-Satellit der NASA und die Plato-Mission der ESA, zu der Heike Rauer am Institut für Planetenforschung am DLR forscht. Für die genauere Massenbestimmung mit Hilfe der Doppler-Wobble Methode werden extrem stabile und hochauflösende Spektrographen für die Teleskope der 8–10-Meter-Klasse entwickelt. Letztendlich ist es aber notwendig, Planeten direkt abzubilden und das Spektrum ihrer Atmosphäre auf die Existenz biogener Moleküle hin zu untersuchen. Die nächsten Weltraumteleskope der NASA, einerseits das JWST mit einem Spiegeldurchmesser von 6,5 Metern, das im Jahr 2017 gestartet werden soll, und einige Jahre später die WFIRST-Mission, die einen speziellen Koronographen zur Ausblendung des Sternlichts beinhaltet, werden wichtige Schritte in diese Richtung unternehmen. Der wirkliche Durchbruch bei der Entdeckung und Untersuchung einer zweiten Erde wird jedoch von der nächsten Generation von Riesen-Teleskopen der 25–40-Meter-Klasse erwartet. Diese Teleskope sollten in der Lage sein, erdähnliche Planeten von ihren Muttersternen zu trennen, abzubilden und zu spektroskopieren.

Dies ist einer der wesentlichen Gründe, warum die Gemeinde der Astronomen die Pläne zum Bau des 30-Meter Teleskops TMT auf dem Maunakea in Hawaii stark befürwortet und unterstützt. Leider ist der Baubeginn für dieses Teleskop in Hawaii im letzten Jahr ins Stocken

geraten, weil eine kleine, aber gut organisierte Gruppe von Hawaiianischen Ureinwohnern den Berg als zu heilig und den Bau des Teleskops als nicht mit ihren kulturellen Traditionen vereinbar betrachtet. Die Staatsregierung und die Universität von Hawaii haben versucht, mit deutlichen Zugeständnissen einen Kompromiss zu erreichen, leider ohne großen Erfolg. Das TMT ist ein weithin sichtbares Zeichen, an dem sich wie bei einem Blitzableiter unter anderem die über Jahrzehnte aufgestaute Wut über die Kolonialisierung und Unterdrückung des Hawaiianischen Volkes entlädt, das aber auch andere Protestkulturen, zum Beispiel gegen genetisch modifizierte Organismen oder andere Entwicklungen der modernen Technik, anzieht. Umgekehrt gibt es auch starke Stimmen in der Hawaiianischen Bevölkerung, die die Teleskope und die Astronomie auf den Vulkangipfeln unterstützen, vor allem wegen ihrer positiven Auswirkungen auf die Ausbildung und Arbeitsmöglichkeiten für ihre Kinder. Letztendlich wird es darauf ankommen, was die Gerichte und die Mehrheit der Bevölkerung in Hawaii entscheiden. Die wichtigste Aufgabe ist in diesem Zusammenhang die konstruktive Kommunikation und die korrekte Information der Bevölkerung.

Ein Punkt der oft missverstanden wird, ist die tatsächliche Größe und die geographische Lage des TMT. In vielen Vorstellungen ist das TMT ein gigantisches Ungetüm, das den kompletten Berg dominieren und entweihen wird. Diese Vorstellung wurde zum Teil auch durch bildliche Darstellungen der Projektbetreiber geschürt. Die Wirklichkeit sieht völlig anders aus. Obwohl das TMT einen etwa 3,75 Mal größeren Hauptspiegeldurchmesser hat, als zum Beispiel das japanische Subaru-Teleskop, wird die Kalotte seines Domes nur etwa 30 % höher sein, als das Subaru-Gebäude. Dies ist dem sehr gut optimierten optischen Design des TMT zu verdanken. Im Rahmen der Vorbereitung auf den Bau haben sich die TMT-Betreiber auch auf einen Kompromiss bezüglich der Lage des Teleskops geeinigt, was auf einem Plateau etliche hundert Meter unterhalb der Gipfelregion gebaut werden soll und nicht von den kulturell empfindlichen Stellen des Berges aus zu sehen ist, eben so wenig wie von 85 % der Insel Hawaii. Wir hoffen, dass die positiven Argumente letztendlich überwiegen und den Bau des TMT in Hawaii doch noch ermöglichen. Das TMT-Konsortium hat aber bereits angekündigt, im Fall weiterer Verzögerungen einen alternativen Bauplatz zu wählen. In diesem sehr bedauerlichen Falle wäre Hawaii vermutlich nicht mehr in der Lage, das Tor zur Entdeckung und zum Studium der Erde-2 aufzumachen.

Anmerkungen

1. Diese Aufzählung stammt aus https://de.wikipedia.org/wiki/Gottfried_Wilhelm_Leibniz (18. Juli 2016)
2. Vgl. <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211> (besucht am 13. 9. 2016)
3. <https://de.wikipedia.org/wiki/Infinitesimalrechnung> (19. Juli 2016)
4. Vgl. <http://www.hawaii.edu/news/2016/06/16/newly-discovered-asteroid-is-earths-companion/> (besucht am 13. 9. 2016)
5. Vgl. <http://exoplanet.eu/catalog> (besucht am 13. 9. 2016)
6. Vgl. http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/k2_100planets/ (besucht am 13. 9. 2016)
7. Vgl. dazu eine jüngst veröffentlichte Pressemitteilung von Wissenschaftlern unseres Institutes: <https://public.nrao.edu/news/pressreleases/2016-alma-water-snowline> (besucht am 13. 9. 2016)
8. Vgl. <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/formingplanet/> (besucht am 13. 9. 2016)
9. Vgl. http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/largest_circumbinary/ (besucht am 13. 9. 2016)
10. Vgl. <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/LonelyPlanet/> (besucht am 13. 9. 2016)

11. Vgl. <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/Kepler-78b/> (besucht am 13. 9. 2016)
 12. Vgl. <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/HabitablePlanetsCommon/> (besucht am 13. 9. 2016).

Abbildungsnachweise

Abb. 1a: akg-images/Nimatallah

Abb. 1b: bpk

Abb. 2: Sternkarte von C. Bremiker, Stunde XXI, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), Archiv

Abb. 3: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute

Abb. 4: Caltech/R. Hurt (IPAC), Lance Hayashida/Caltech

Abb. 5, 6: K. Teramura, UH Institute for Astronomy

Literatur

- Hall, A. Rupert und Hall, M. Boas (1962). *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hasinger, Günther (2009). *Das Schicksal des Universums. Eine Reise vom Anfang zum Ende*. München: Verlag C.H. Beck.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1972). „Tentamen de motuum coelestium causis“. In: *Mathematische Schriften*, Bd. VI. Hrsg. von C. I. Gerhardt. Hildesheim: Georg Olms Verlag, S. 144–161.
- Newton, Isaac (1972). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. The third edition (1726) with variant readings. Hrsg. von Alexandre Koyré, I. Bernhard Cohen und Anne Whitman. Cambridge: Cambridge University Press.
- Verelst, Karin (2012). *Newton vs. Leibniz: Intransparency vs. Inconsistency*. URL: <http://arxiv.org/abs/1203.2292v1> (besucht am 13. 9. 2016)