



Auf der Suche nach extrasolaren Planeten

Die COROT-Mission

Gibt es außer unserem Sonnensystem auch andere Planetensysteme? Diese Frage kann erst seit wenigen Jahren durch Messungen beantwortet werden. Ob unsere Welt allein im Universum ist, beschäftigt die Menschen aber schon seit langer Zeit. Während z.B. Demokrit (~460-370 v. Chr.) und Epikur (341-270 v. Chr.) von der Existenz einer Vielzahl von Welten ausgingen, belebte und unbe-

lebte, war Aristoteles (384-322 v. Chr.) der Meinung, dass es nur eine Welt geben kann. Diese Meinung hat sich für lange Zeit durchgesetzt, und die Erde wurde in das Zentrum des Weltalls gerückt. Erst 1543 führte Nikolaus Kopernikus das heliozentrische Weltbild ein und zeigte, dass die Planeten um die Sonne kreisen und nicht umgekehrt. Ob es außerhalb unseres Sonnensystems Planeten gibt, blieb lange Zeit

unbeantwortet. Dass die physikalischen Bedingungen zur Bildung von Planetensystemen auch anderswo vorhanden sind, wurde von den meisten Wissenschaftlern bereits vor ihrer tatsächlichen Entdeckung vermutet. Wie häufig Planetensysteme sind und vor allem, ob es außer unserem weitere Planeten gibt, auf denen sich Leben bilden kann, ist aber bis heute eine offene Frage.

Die Planeten um andere Sterne sind zu weit entfernt und lichtschwach, um von ihnen Bilder, wie wir sie durch die Raumsonden von den Planeten unseres Sonnensystems kennen, gewinnen zu können. Aber man kann auf indirektem Weg viel über die Natur der Objekte erfahren. Bereits die bisher entdeckten Planeten werfen Fragen nach den Entstehungsprozessen von Planeten und deren weitere Entwicklung auf, die auch unser Sonnensystem in einem neuen Licht erscheinen lassen. Durch die Entdeckung extrasolarer Planeten wurde die Erforschung von Planeten über unser Sonnensystem hinaus zu anderen Planetensystemen ausgedehnt.

Noch haben wir nicht annähernd erkundet, welche Formen Planetensysteme annehmen können. Das liegt vor allem daran, dass wir mit Teleskopen vom Erdboden aus nur große Gasplaneten, von der Größe des Jupiter, detektieren können. Mit der Satellitenmission COROT (**C**onvection-**R**otation and planetary **T**ransits) der französischen Agentur CNES wird man ab 2006 zum ersten Mal Planeten von nur wenigen Erdradien Größe entdecken können. Dies wird einer der wichtigsten Meilensteine auf dem Weg zur Entdeckung von Planeten sein, die der Erde ähneln und die vielleicht auch Bedingungen zur Entwicklung von Leben ermöglichen. Das DLR ist einer der an dieser Mission beteiligten europäischen Partner und liefert sowohl technische, als auch wissenschaftliche Beiträge zur Entwicklung der Mission.

Erste Erkenntnisse

Das besondere Interesse der Erforschung extrasolarer Planeten gilt Planeten um Sterne, die der Sonne ähneln. Der erste Planet um einen sonnenähnlichen Stern (51 Pegasus) wurde im Jahr 1995 von einer Schweizer Forschungsgruppe um Michel Mayor entdeckt. Dieser erste entdeckte Planet sorgte sofort für eine Überraschung. Er umkreist seinen Zentralstern

in nur vier Tagen und fünf Stunden im Abstand von nur 0,05 AE (1 AE = 1 astronomische Einheit = mittlerer Abstand Erde-Sonne = 149,6 Millionen Kilometer). Er hat eine Masse von mindestens 46 Prozent der Jupitermasse, das heißt, es handelt sich um einen dem Jupiter oder Saturn ähnlichen großen Gasplaneten. Zum Vergleich: der innerste Planet unseres Sonnensystems, Merkur, umkreist die Sonne in 0,39 AE Abstand, achtmal weiter entfernt als der Planet um 51 Pegasus (man bezeichnet Planeten mit dem Namen des Sterns und Kleinbuchstaben: 51 Peg b).

Mit der bei 51 Pegasus erfolgreichen Messmethode werden auch heute noch die meisten extrasolaren Planeten entdeckt. Man nutzt dabei aus, dass Stern und Planet um ihren gemeinsamen Masseschwerpunkt kreisen und sich also auch der Zentralstern periodisch bewegt. Dabei wird das von ihm ausgesandte Licht entsprechend seiner zu uns gerichteten, radialen Geschwindigkeitskomponente spektral verschoben (Doppler-Effekt). Mit den heutigen Messgrenzen der Dopplergeschwindigkeit von circa drei Meter in der Sekunde können Planeten von nur zwölf Prozent des Jupiter entdeckt werden. Wegen der unbekanntenen Lage der Bahnebene des Planeten relativ zum Beobachter (Bahninklination) sind die Massen aber nur untere Grenzen. Die wahre Masse könnte größer sein.

Inzwischen hat man 120 extrasolare Planeten entdeckt, von denen sich 20 innerhalb von 0,1 AE um ihren Zentralstern bewegen. Die Klasse der 51 Pegasus-ähnlichen Planeten, oder auch „heiße Jupiter“, wie sie oft genannt werden, ist eine der größten Überraschungen der bisherigen Suche nach Planeten. Massereiche Gasplaneten finden sich in unserem Sonnensystem nur außerhalb von circa fünf AE, das heißt ab der Jupiterbahn. Die inneren terrestrischen Planeten bestehen hauptsächlich aus Gestein und haben wesentlich kleinere Massen. Die Planeten haben

sich bald nach der Entstehung des Zentralsterns in einer flachen, den Stern umkreisenden Scheibe aus Gas und Staub gebildet. Bisher hat man angenommen, dass sich massereiche Gasplaneten in der inneren Scheibe des frühen Sonnensystems auf Grund der hohen Temperaturen und der begrenzten vorhandenen Masse nicht bilden konnten. Wie erklärt man sich nun die Existenz der „heißen Jupiter“? Sofort nach Entdeckung von 51 Peg b begann man darüber nachzudenken, wie ein solcher Planet existieren kann. Ein Vorschlag bleibt bei der Vorstellung, dass sich massereiche Gasplaneten nur in größerer Entfernung vom Zentralstern bilden können. Aber der junge Planet könnte in seiner Bewegung durch die Scheibe abgebremst worden sein und schließlich auf Spiralbahnen nach innen zum Zentralstern laufen. Modellrechnungen zeigen, dass dieser Mechanismus sehr effektiv ist. So effektiv, dass man nicht recht weiß, was ihn aufhält und warum die beobachteten 51 Pegasus-artigen Planeten heute auf stabilen Bahnen laufen. Vielleicht sind näher am Stern entstandene Planeten tatsächlich in ihren Zentralstern gefallen. Auch für unser Sonnensystem wirft dieser Mechanismus Fragen auf. Ist etwa Jupiter auch viel weiter außen entstanden, als wir ihn heute beobachten? Und wenn ja, was hat ihn dann in seiner heutigen Bahn aufgehalten? Ein alternativer Vorschlag geht davon aus, dass es vielleicht auch Staubscheiben gab, die wesentlich massereicher waren als in unserem frühen Sonnensystem. Dann könnten vielleicht doch massereiche Planeten sehr nah am Zentralstern entstehen.

Exzentrische Orbits

Eine weitere Überraschung ergab sich durch die Entdeckung von Planeten auf sehr exzentrischen Orbits. Im Sonnensystem sind es Merkur und Pluto, mit einer Exzentrizität von 0,2 ($e=0$ entspricht einer Kreisbahn), deren Orbits deutlich elliptisch sind. Unter den extrasolaren Plane-



Abb. vorhergehende Seite: Ein Blick in die Tiefe des Universums.

Abb. rechts: Die Erde, aufgenommen mit dem Galileo-Satelliten. Die Entdeckung eines Planeten, der unserer Erde ähnelt, ist eines der Ziele der Suche nach extrasolaren Planeten. Zukünftige Missionen werden in der Lage sein, terrestrische Planeten in extrasolaren Planetensystemen zu entdecken und sie näher zu untersuchen.

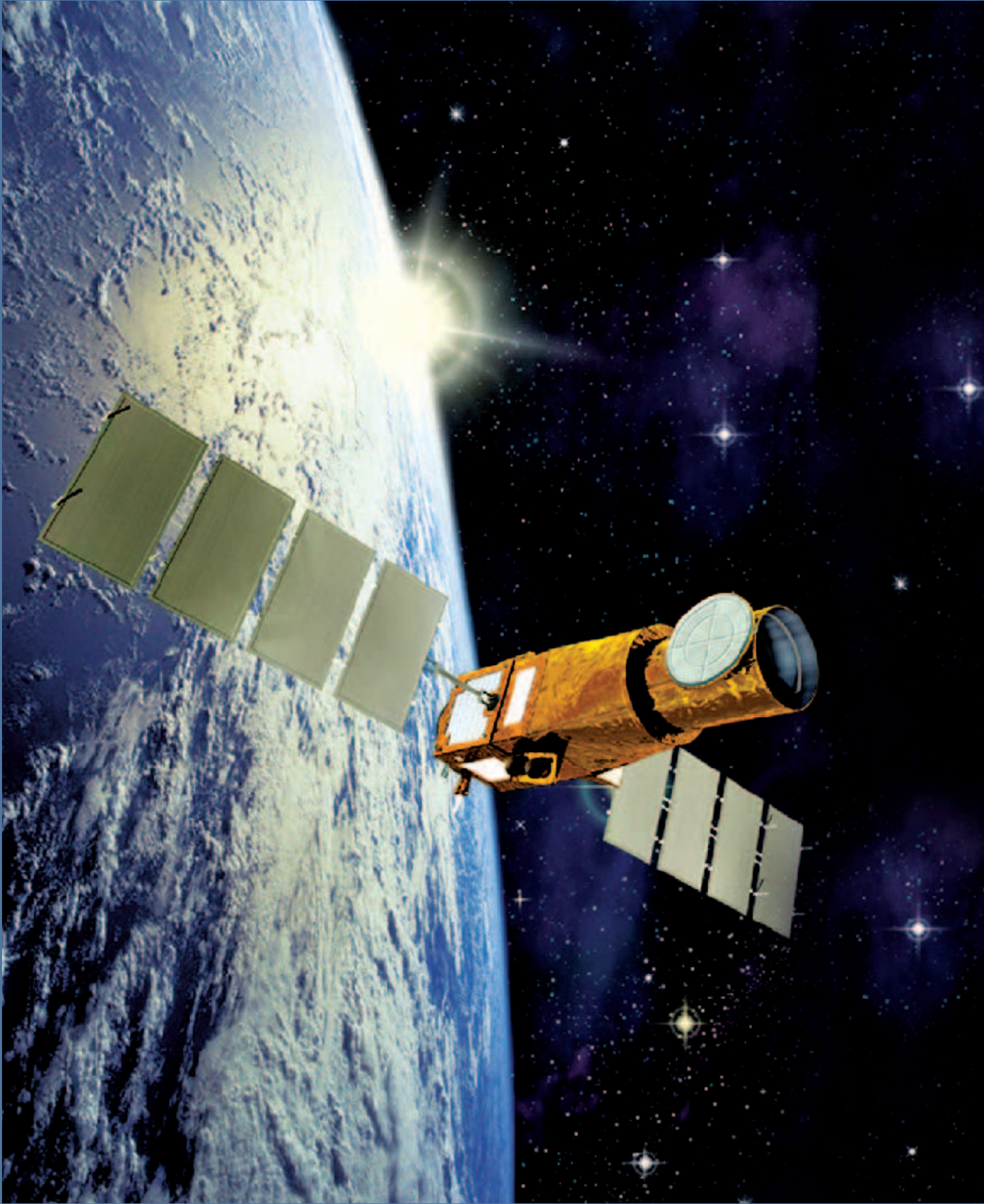


Abb. oben: Illustration des COROT-Satelliten.

ten befinden sich viele auf exzentrischen Orbits, bis etwa zu einer Exzentrizität von etwa 0,7. Wie sind die elliptischen Bahnen entstanden? Eigentlich sollten Planeten nach ihrer Bildung in der protoplanetaren Scheibe annähernd kreisförmige Bahnen haben, so wie in unserem Sonnensystem. Nimmt man aber an, dass sich in einem Planetensystem viele massereiche Planeten gebildet haben, könnten sie sich durch gravitative Wechselwirkung gegenseitig in ihren Umlaufbahnen gestört haben.

Von 120 bisher entdeckten Planeten befinden sich 13 in Planetensystemen mit mehr als einem Planeten. Die Zeitbasis der Beobachtungen ist seit 1995 erheblich gewachsen. Der heute bekannte Planet mit der längsten Umlaufperiode hat eine Periode von fast acht Jahren und umkreist seinen Stern in 4,8 AE Entfernung. Die Entdeckung der Planeten durch die Radialgeschwindigkeitsmethode ist umso effektiver, je massereicher der Planet ist und je kleiner sein Bahnabstand. Der zuletzt genannte Effekt sorgt zusammen mit den langen Bahnperioden dafür, dass es schwieriger ist, Planeten bei großen Abständen zu entdecken. Man würde aber noch einen anderen Auswahlereffekt bei den Messungen erwarten. Durch die Abhängigkeit von der Planetenmasse sollten eigentlich mehr massereiche Planeten entdeckt werden. Es ist aber genau das Gegenteil der Fall. Die Statistik steigt für massearme Planeten steil an. Auf Grund dieser Tatsache vermutet man, dass es noch weit mehr wesentlich masseärmere Planeten geben muss.

Die Transitmethode

Ein wesentliches Ziel der Suche nach extrasolaren Planeten ist es, kleine, terrestrische Planeten entdecken zu können, die ihren Stern in dem Abstandsbereich umkreisen, in dem flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche existieren kann. Man nennt diesen Bereich die „habitable Zone“ um

einen Stern. Gibt es sogar irgendwo eine zweite Erde? Hier stößt die Messung mit der Radialgeschwindigkeitsmethode an ihre Grenzen. Sie könnte zwar kleine Planeten um massearme Sterne detektieren, aber nicht um einen sonnenähnlichen Stern. Man versucht daher, mit einer anderen Messmethode, der Transitmethode, zu kleineren Massen vorzudringen.

Bei der Transitmethode misst man die Verdunkelung des Zentralsterns, wenn sich der umkreisende Planet vor den Stern schiebt, ähnlich wie der Mond bei einer Sonnenfinsternis. Der Planet verdunkelt seinen Stern dabei aber nicht ganz. Die abgedeckte Fläche ist proportional zum Radius des Planeten. Die Abschwächung des Lichts entspricht für sonnenähnliche Sterne bei einem jupitergroßen Planeten etwa einen Prozent, für die Erde wären es nur 0,01 Prozent. Aus der Messung des Abfalls der Sternintensität während eines solchen Transits, lässt sich der Radius des Planeten bestimmen. Hat man den Planeten zusätzlich mit der Radialgeschwindigkeitsmethode gemessen, kann sogar seine wahre Masse bestimmt werden.

Der erste Stern, bei dem mit einem bodengebundenen Teleskop ein Transit beobachtet werden konnte, war HD209458. Sein Planet war ursprünglich durch die Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt worden. Es zeigte sich, dass er alle dreieinhalb Tage vor dem Stern vorbeizieht. Durch die kombinierten Messungen konnte seine wahre Masse von 69 Prozent der Jupitermasse und sein Radius von 1,4 Jupiterradien bestimmt werden. Er gehört mit einer Bahn bei 0,045 AE zur Klasse der „heißen Jupiter“-Planeten.

Inzwischen wird mit der Transitmethode gezielt nach Planeten gesucht. Die Wahrscheinlichkeit, einen Planeten beim Durchgang vor seinem Stern zu beobachten, ist klein, da die Bahnebene geeignet orientiert sein muss. Die Wahrscheinlichkeit beträgt für einen sternnahen „heißen

Jupiter“ etwa zehn Prozent. Es ist deshalb wichtig möglichst viele Sterne zu untersuchen. Zusätzlich braucht man eine genügend lange Zeitbasis für die Messungen. Für eine sichere Messung möchte man ein Transitereignis mehr als einmal beobachten. Zwei Messungen erlauben die Bestimmung der Periode, eine dritte gibt die Bestätigung der Messungen. Für einen Planeten mit drei bis vier Tagen Umlaufperiode würden zwei Wochen genügen, falls man kontinuierlich Daten erhalten kann. Mit erdgebundenen Teleskopen ist das natürlich nicht möglich. Transitereignisse während des Tages oder in Schlechtwetterperioden bleiben unbeobachtet. Man benötigt also tatsächlich eine erheblich längere Zeitbasis, um erfolgreich Planetentransits detektieren zu können. Hinzu kommt, dass in erdgebundenen Messungen unter anderem die Hintergrundhelligkeit des Himmels die Genauigkeit der Intensitätsmessungen begrenzt. Mit der Transitmethode können daher von der Erde aus nur etwa Jupiter-große Planeten gefunden werden. Will man zu kleinen, terrestrischen Planeten vordringen, muss man die Messung vom Weltall aus durchführen, wie mit COROT geplant.

Die erdgebundene Suche nach Planetentransits ergab inzwischen zwei Kandidaten für neu entdeckte massereiche Planeten. Gemessen wurde an einem 1,3-Meter-Teleskop in Chile. Wenn sich diese Messungen bestätigen, gibt es Planeten mit einer Bahnperiode von nur etwas mehr als einem Tag.

Das Institut für Planetenforschung des DLR, Berlin, betreibt ein Suchprogramm nach Planetentransits mit Hilfe eines Schmidt-Teleskops mit 20 Zentimeter Öffnung, ausgestattet mit einer CCD-Kamera. Es handelt sich bei allen Teilen um kommerzielle Komponenten. Ein solches „kleines“ Teleskopsystem bietet mehrere Vorteile. Es steht kontinuierlich für Messungen zur Verfügung, das heißt, man muss die Messzeit nicht wie an

Groß-Teleskopen mit vielen anderen Nutzern teilen. Es bietet ein weites Bildfeld von drei mal drei Grad und erlaubt damit die Bearbeitung mehrerer Zehntausend Sterne in jeder Belichtung. Die photometrische Genauigkeit des Systems reicht aus, um Planetentransits von Jupiter-Großen Planeten zu detektieren. Mit einem solchen Teleskop können allerdings nur relativ helle Sterne (heller als 14. Magnitude) untersucht werden. Dies ist aber kein Nachteil, sondern es sind gerade die hellen Sterne, die Nachfolgebeobachtungen erlauben, wie z.B. die Bestimmung der wahren Masse. Das Teleskop dient der Unterstützung der COROT-Mission, indem es die helleren Sterne der Zielfelder schon vor dem Start charakterisiert.

Transits von Planeten vor sehr hellen Sternen erlauben weiter gehende Untersuchungen der Planeten. Spektroskopische Messungen während eines Transits erlauben die Untersuchung der Atmosphäre des Planeten, da das Licht des Sterns durch die Atmosphäre des Planeten hindurch scheint. Mit dem Hubble Space Telescope durchgeführte Messungen während Transits des Planeten um HD209458 haben den Nachweis für H, O, C und Na in der oberen Atmosphäre erbracht. Aufgrund der großen Nähe des Planeten zu seinem Stern sind dort völlig andere Bedingungen als etwa bei Jupiter in unserem Sonnensystem zu erwarten. So deuten die Messungen darauf hin, dass der Planet um HD209458 wahrscheinlich einen großen Teil seiner Atmosphäre verliert. Dies führt zu Spekulationen, ob es vielleicht Planeten gibt, bei denen es sich nur um die Gesteinskerne ehemaliger Gasplaneten handelt.

Planetensuche via Satellit

Es liegt auf der Hand, dass man durch Messungen mit Hilfe eines Satelliten die Wahrscheinlichkeit Planeten zu entdecken, wesentlich erhöht. Man erhält eine kontinuierliche Zeitbasis der Messungen und

erhöht die photometrische Messgenauigkeit erheblich. Für die Suche nach kleinen, terrestrischen Planeten um sonnenähnliche Sterne ist der Schritt zur Messung mittels Satelliten unabdingbar.

Der erste Satellit, der nach extrasolaren Planeten suchen wird, ist die COROT-Mission. Das Instrument besteht aus einem afokalen Spiegelteleskop mit 27 Zentimeter Öffnung und einem Bildfeld von $2,8 \times 2,8$ Grad. Die Fokalebene besteht aus vier CCDs zur photometrischen Messung von Sternintensitäten. Damit wird nicht nur nach extrasolaren Planeten gesucht, sondern als zweite Zielstellung auch die Pulsation von Sternen (Astroseismologie) untersucht. Das DLR entwickelt in Zusammenarbeit mit zwei Firmen (IB Ulmer, Cliphit) die Flugsoftware für das Instrument dieses Kleinsatelliten. Der Satellit wird Mitte 2006 starten und in ein polares Erdorbit gebracht. Durch photometrische Messung von stellaren Lichtkurven wird nach Transits extrasolarer Planeten gesucht. Die Mission wird erstmals Planeten detektieren können, die nur wenige Erdradien groß sind. Dies ist allerdings nur für Planeten auf sternnahen Umlaufbahnen möglich, da das Bildfeld des Satelliten auf Grund des polaren Erdorbits spätestens alle sechs Monate gewechselt werden muss. Während der Missionslaufzeit von zweieinhalb Jahren werden daher mehrere Bildfelder für jeweils 150 Tage nach Planeten durchsucht. COROT wird natürlich auch viele der größeren Gasplaneten finden und damit unser Wissen über die verschiedenen Formen von Planetensystemen wesentlich erweitern. Mit der Entdeckung von kleinen, terrestrischen Planeten von nur wenigen Erdradien bildet COROT einen wesentlichen Meilenstein auf der Suche nach einer „zweiten Erde“.

Um schließlich Planeten von der Größe der Erde in der „habitablen Zone“ um ihren Zentralstern zu finden, braucht man größere Teleskope und längere Beobach-

tungszeiten eines Bildfeldes. Satelliten mit diesem Ziel sind bereits geplant. Die NASA plant für 2007 den Start des Satelliten Kepler, der ein Bildfeld vier Jahre lang nach Planetentransits durchsuchen soll, um einen der Erde ähnlichen Planeten zu finden. Der Satellit trägt ein Teleskop mit 95 cm Öffnung und einem Bildfeld von 105 Quadratgrad.

Das Fernziel der Untersuchung extrasolarer Planeten ist es, die entdeckten erdähnlichen Planeten näher zu untersuchen. Gibt es dort eine Atmosphäre, in der sich Leben ähnlich dem auf der Erde entwickeln könnte? Sowohl ESA also auch NASA planen im Zeitraum der nächsten Dekade Missionen (ESA: Darwin, NASA: Terrestrial Planet Finder), mit denen extrasolare Planeten sowohl abgebildet werden können, als auch ihre Atmosphäre mittels Spektroskopie näher untersucht werden soll. In Atmosphären erdähnlicher Planeten soll nach Signaturen für Bedingungen zur Entwicklung von Leben gesucht werden. Solche Signaturen in der Atmosphäre der Planeten wären z.B. Kohlendioxid, Sauerstoff, Ozon und Wasserdampf.

Seit der Entdeckung von Planeten um andere Sterne wissen wir, dass unser Sonnensystem nicht das Einzige im Universum ist. Damit können wir einige der Fragen beantworten, über die schon seit Jahrhunderten spekuliert wurde. Ob es allerdings einen Planeten gibt, auf dem sich Leben entwickeln könnte, bleibt auch heute noch eine offene Frage, deren Beantwortung wir aber durch die zukünftigen Untersuchungen extrasolarer Planeten näher rücken werden.

Heike Rauer, Anders Erikson, Holger Voss sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Planetenforschung, Berlin-Adlershof. ◀



Abb. oben: Der Jupiter, aufgenommen von Voyager. Bei den bisher entdeckten extrasolaren Planeten handelt es sich um große Gasplaneten, die Jupiter oder Saturn in unserem Sonnensystem ähneln. Allerdings kommen in anderen Planetensystemen Gasplaneten auch in wesentlich kleinerem Abstand zu ihrem Zentralstern vor, als es im Sonnensystem der Fall ist.