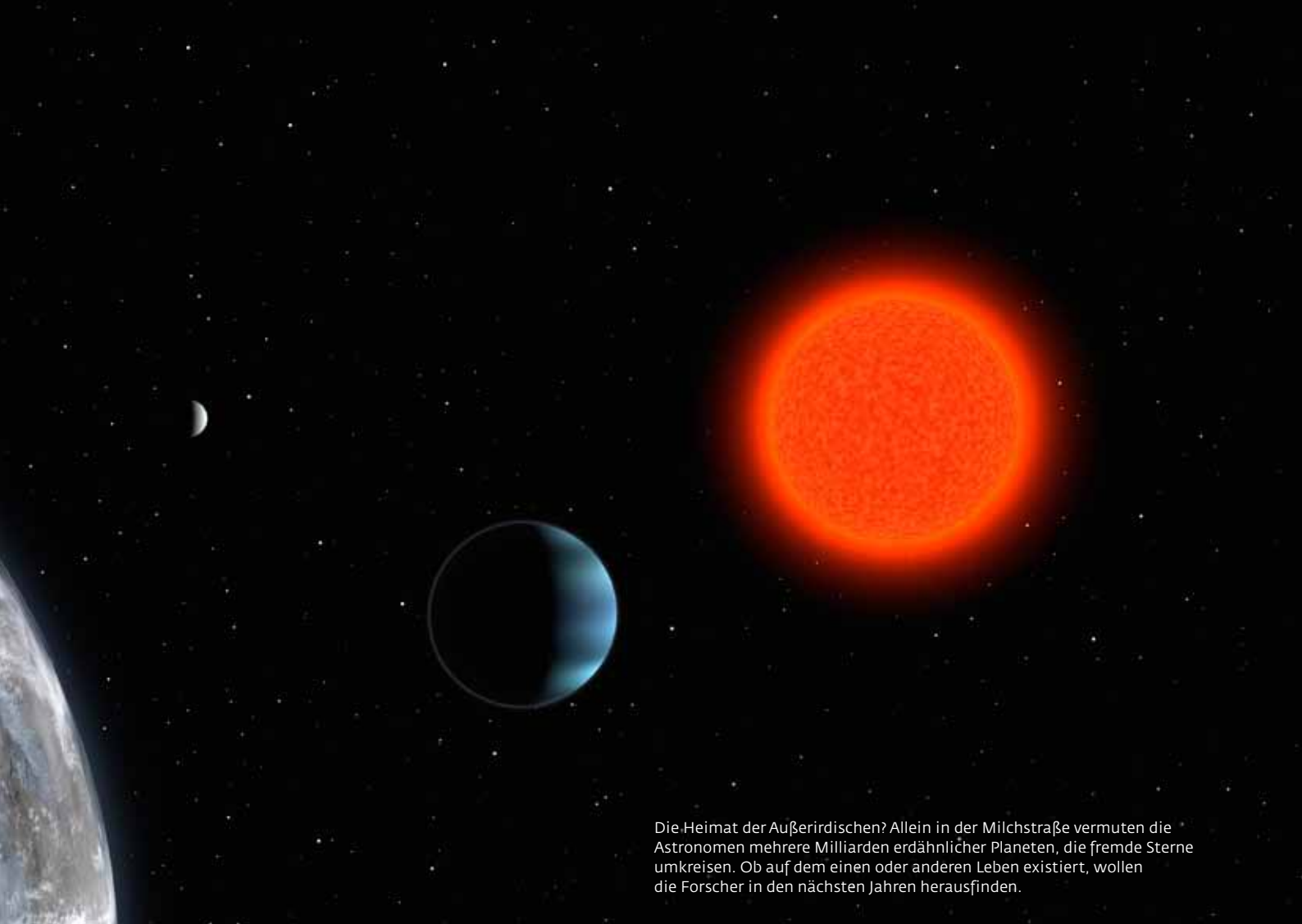




Zweite Erde gesucht

Nahezu 800 Planeten, die ferne Sterne umkreisen, haben Astronomen mittlerweile entdeckt. Nur auf drei von ihnen könnten lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Vermutlich gibt es in der Milchstraße aber viele zweite Erden. Doch wie weist man Lebensspuren auf Exoplaneten nach? Dieser Frage widmet sich **Lisa Kaltenegger** am **Max-Planck-Institut für Astronomie** in Heidelberg.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**



Die Heimat der Außerirdischen? Allein in der Milchstraße vermuten die Astronomen mehrere Milliarden erdähnlicher Planeten, die fremde Sterne umkreisen. Ob auf dem einen oder anderen Leben existiert, wollen die Forscher in den nächsten Jahren herausfinden.

Max Planck sagte einmal von sich, nach dem Abitur hätte er ebenso gut Musik wie auch Altphilologie studieren können.

Dass es die Physik wurde, verdankte er seinem Mathematiklehrer und dem „Wunsch, den Naturgesetzen noch etwas näher nachzuforschen“. Sicher würde sich Lisa Kaltenegger in ihrer Bescheidenheit nicht mit dem Pionier der Quantenphysik vergleichen wollen, aber das weitgefächerte Interesse und den Anstoß zur Astronomie hat sie mit ihm gemeinsam.

Anders als Planck hat sie tatsächlich mit einem breiten Fächerkanon begonnen, hat Japanisch, Film- und Medienkunde, Betriebswirtschaft sowie technische Physik und Astronomie studiert, um herauszufinden, was sie am meisten fasziniert. Dafür musste sie zwischen der Technischen Universität und der Universität in Graz ständig hin- und

herpendeln. „Mit dem Fahrrad ging das in zehn Minuten“, kommentiert sie heute die Bewältigung dieses Studien-Fünfkampfs gelassen.

SPEKTRALER FINGERABDRUCK UNSERES PLANETEN

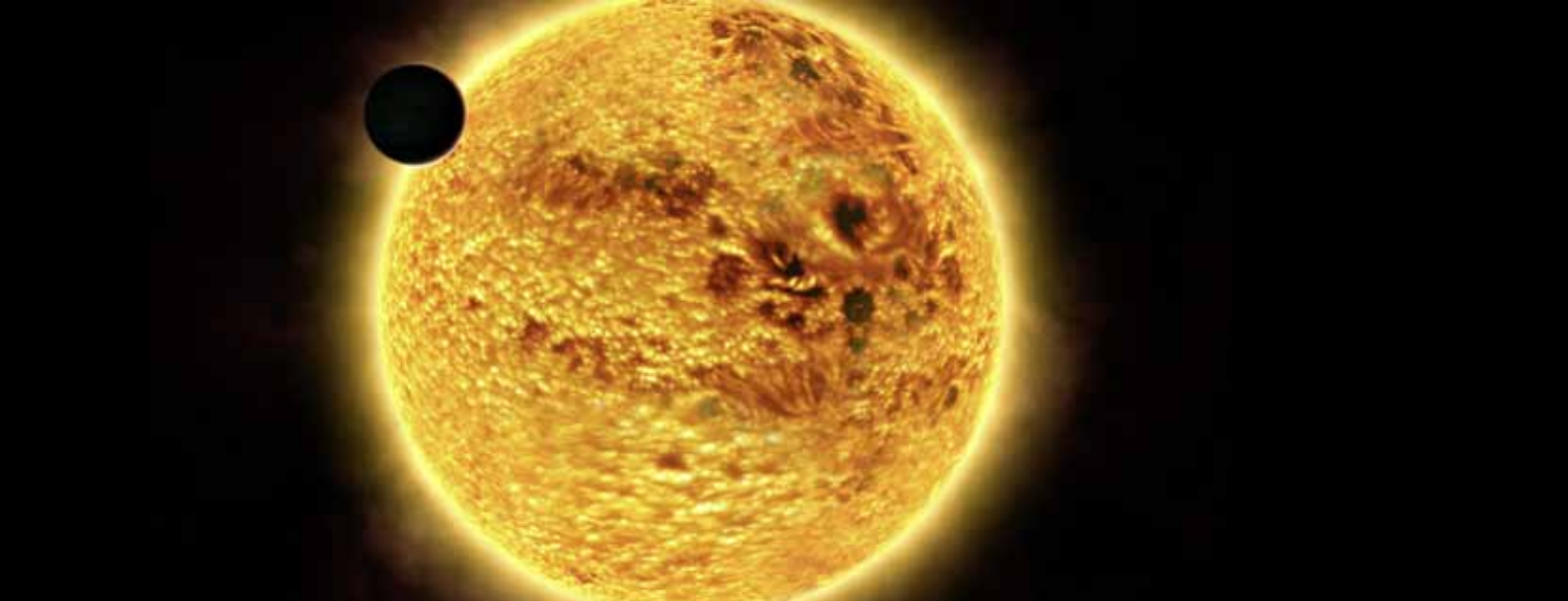
Auf Dauer konnte sie den natürlich nicht durchhalten, und schließlich entschied sie sich für technische Physik und Astronomie – obwohl ihr ein Berufsberater dringend von einem naturwissenschaftlichen Berufsweg abgeraten hatte. Eine Frau könne sich darin nur schwer behaupten, meinte er.

Knapp 20 Jahre später leitet Lisa Kaltenegger am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg eine Emmy-Noether-Gruppe und ist gleichzeitig Research Associate am renommierten Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, wo sie sich drei Monate im Jahr aufhält. Sie zählt zu den kreativsten

und kompetentesten Fachleuten für extrasolare Planeten. Dieses Jahr wurde sie von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Forschungsmi-nisterium mit dem angesehenen Heinz Maier-Leibnitz-Preis für Physik ausgezeichnet.

Im Jahr 1993 veröffentlichte der amerikanische Astrophysiker Carl Sagan den spektralen Fingerabdruck der Erde, der mit der Raumsonde *Galileo* aufgenommen wurde. Ein solches Spektrum können auch Bewohner auf fernen Planeten von unserem Planeten machen und anhand dessen auf unsere Existenz schließen. Umgekehrt müsste es uns möglich sein, auf einem der Exoplaneten nach solchen Lebensspuren zu suchen.

Die Entdeckung des ersten Exoplaneten, also eines Himmelskörpers, der um einen fernen Stern kreist, bescherte im Jahr 1995 nicht nur der Astronomie einen neuen, stark expandierenden For-



schungszweig, sondern elektrisierte auch die Abiturientin Lisa Kaltenecker. Befördert hat diese Begeisterung ein guter Physiklehrer, der im Unterricht auch Astronomie anbot. Freilich, ihr unweit von Salzburg gelegener Heimatort Kuchl ist weniger für die Himmelsforschung als für seine Holzverarbeitung und Landwirtschaft bekannt. Aber ihre Eltern sorgten in der Familie für geistig anregende Themen.

PALÄONTOLOGEN UND BIOLOGEN MIT IM BOOT

„In Österreich arbeitete aber Ende der 1990er-Jahre niemand an Exoplaneten“, sagt Lisa Kaltenecker. Blieb also nur das Ausland. So folgten Forschungsaufenthalte am Instituto de Astrofísica de Canarias auf Teneriffa, an der Johns Hopkins University in Baltimore und bei der Europäischen Weltraumorganisation ESA in den Niederlanden. Dort arbeitete sie in einem Designteam an dem

Projekt *Darwin* mit, einem ambitionierten Plan, der mehrere Teleskope im Weltraum vorsah, um erdähnliche Planeten bei anderen Sternen aufzuspüren und zu untersuchen. Hier kam ihr auch zugute, dass sie sowohl Ingenieurs- als auch Astronomiekenntnisse besaß.

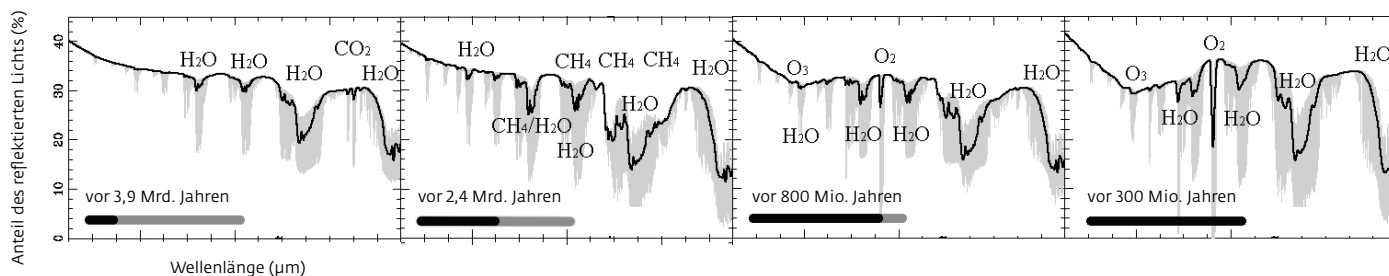
Darwin wurde zwar auf Eis gelegt, ebenso wie eine ähnliche Mission der NASA. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Suche nach einer zweiten Erde aufgegeben wurde – für Lisa Kaltenecker schon gar nicht. Besonders die Mission *Kepler* spornte sie an, weil deren faszinierende Funde die Zahl der potenziell erdähnlichen Planeten stark erhöht hat, was Missionen wie *Darwin* wieder realistischer erscheinen lässt. „Die Entdeckung von Lebensspuren auf einem anderen Planeten wäre einer der ganz großen Schritte in der Erforschung des Universums“, sagt Kaltenecker.

„Diese enorme Erkenntnis hätte natürlich gesellschaftliche, religiöse und philosophische Folgen. Aus wissen-

schaftlicher Sicht böte sie aber auch die Chance, etwas über die Entwicklung unseres eigenen Planeten zu erfahren und rein statistisch einen Blick in die Zukunft erdähnlicher Planeten zu werfen“, schwärmt die Max-Planck-Forscherin.

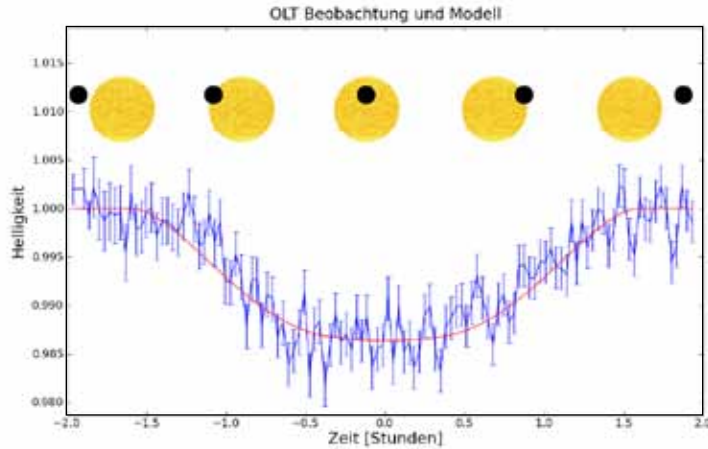
Die Entwicklung der Erde bildet letztlich auch den Schwerpunkt ihrer Arbeit. Ihre Idee ist im Prinzip einfach: „Wenn wir in der Lage sind, einen fernen Gesteinsplaneten spektroskopisch zu untersuchen, was könnten Indikatoren für Leben sein? Wir können ja nicht davon ausgehen, dass sich mögliches Leben dort im selben Entwicklungsstadium befindet wie derzeit bei uns.“ Also beschäftigte sie sich in einem ersten Schritt mit der Entwicklung der Atmosphäre seit der Entstehung unseres Planeten und arbeitete dabei eng mit Biologen und Paläontologen zusammen.

Zu Beginn herrschten in der Uratmosphäre Kohlendioxid (CO₂), Stickstoff und Wasser vor. Als vor 3,5 Milliarden Jahren die ersten Lebewesen



Wer in die Ferne schweifen möchte, muss zunächst das Naheliegende kennen. Aus diesem Grund beschäftigt sich Lisa Kaltenecker mit der Entwicklung der irdischen Atmosphäre, bevor sie diese Erkenntnisse auf andere, noch unbekannte Planeten überträgt. Dabei interessiert sie vor allem, welche Fingerabdrücke in den Spektren aus unterschiedlichen Epochen zu beobachten wären. So herrschten vor 3,9 Milliarden Jahren, also in der Frühgeschichte unseres Planeten, Wasser (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂) vor. Danach erzeugten die ersten Lebewesen Methan (CH₄) und später Sauerstoff. Dessen Menge wuchs, und parallel zum molekularen Sauerstoff (O₂) verbreitete sich in der Atmosphäre auch Ozon (O₃). Seit etwa 300 Millionen Jahren ist der Anteil von Sauerstoff mit einem Wert von 21 Prozent nahezu unverändert.

xxxxxxx



Sternfinsternis: Es gibt mehrere Methoden, Exoplaneten nachzuweisen. Eine bedient sich des Transits: Dabei zieht der Planet, von der Erde aus gesehen, vor seiner Muttersonne vorüber – ähnlich wie die Venus am 5./6. Juni 2012 vor der Sonne. Aus der abnehmenden Helligkeit und der Lichtkurve während der Passage schließen die Astronomen auf die Eigenschaften des Exoplaneten; im günstigsten Fall erlaubt das Verfahren außerdem Spektralbeobachtungen seiner Atmosphäre.

auftraten, erzeugten sie Methan, das sich rasch in der Luft anreicherte, während der CO_2 -Gehalt abnahm. Vor 2,4 Milliarden Jahren produzierten dann die ersten Lebewesen Sauerstoff, dessen Anteil in der Atmosphäre langsam wuchs und vor etwa 300 Millionen Jahren den bis heute nahezu unverändert gebliebenen Wert von 21 Prozent erreichte. Parallel zu dem Anstieg des molekularen Sauerstoffs O_2 verbreitete sich auch Ozon (O_3). Parallel dazu veränderten sich die Anteile von Kohlendioxid und Methan.

Lange Zeit meinten Astrobiologen, größere Konzentrationen von Sauerstoff und Ozon seien bereits sichere Indikatoren für Leben. Doch Lisa Kaltenegger kommt zu einem anderen Ergebnis: „Entscheidend sind Kombinationen, etwa von molekularem Sauerstoff und Ozon mit einem reduzierenden Gas wie Methan.“ In größeren Mengen vorhanden, dienen diese Spezies als die besseren Bioindikatoren. Denn jeder Stoff für sich kann auch auf anorganische Weise entstehen. Sauerstoff etwa durch die Spaltung von Kohlendioxid und Wasser aufgrund des Sternenlichts.

Aber Sauerstoff und Methan reagieren schnell miteinander und erzeugen Wasser und Kohlendioxid oder -monoxid. Würden auf der Erde von heute auf morgen alle Pflanzen die Sauerstoffproduktion einstellen, so wäre binnen etwa einer Million Jahre der Sauerstoff so gut wie verschwunden. Deswegen dürfte der Sauerstoffanteil in der Atmosphäre gering sein, wenn er auf anorganische Weise entsteht.

Als Postdoc entwickelte Kaltenegger in Harvard mit ihrem Atmosphären-Computermodell die variierende chemi-

sche Zusammensetzung der Erdatmosphäre für mehrere Entwicklungsphasen auf der Grundlage von Fossilienfunden. Daraus ergaben sich die spektralen Fingerabdrücke von Leben. Das überraschend positive Ergebnis: „Etwa über die zweite Hälfte der bisherigen Erdgeschichte hätten sich für Außerirdische Lebensspuren in der Atmosphäre nachweisen lassen, und zwar als Kombination von Sauerstoff oder Ozon mit Methan und Wasser.“

OHNE PLATTENTEKTONIK KEIN GASRECYCLING

Vergleichbares könnte dann auch für andere erdähnliche Exoplaneten gelten. Voraussetzung bei all diesen Überlegungen ist natürlich, dass das Leben dort zumindest annähernd nach denselben chemischen Prinzipien funktioniert wie bei uns: Es benötigt flüssiges Wasser und basiert auf einer Kohlenstoffchemie. „Die Auswirkungen anderer, uns fremder Lebensformen auf die Atmosphäre können wir nicht simulieren“, sagt Lisa Kaltenegger.

Natürlich kann die Wissenschaftlerin auch nicht davon ausgehen, dass eine zweite Erde die gleichen physikalischen Eigenschaften besitzt wie unser Planet. Er kann kleiner oder größer sein, heißer oder kühler, trockener oder wasserreicher. Auf jeden Fall muss es sich um einen Gesteinsplaneten handeln, wie es in unserem Sonnensystem neben der Erde noch Merkur, Venus und Mars sind.

Ist ein Planet mehr als doppelt so groß und dadurch bei gleicher Dichte etwa zehnmal so schwer wie die Erde, so wird es sich eher um einen Gaspla-

neten handeln, eine Art Mini-Neptun. Ist er hingegen sehr klein, so wie Mars, besitzt er eventuell keine Plattentektonik. Die spielt aber eine sehr bedeutende Rolle in der Entwicklung eines Planeten und seiner Atmosphäre – erlaubt sie es doch, Gase zu recyceln.

Die ins Erdinnere absinkende Lava kann Kohlendioxid binden und aus der Atmosphäre entfernen. Vulkane hingegen bringen CO_2 wieder in die Atmosphäre ein. Deshalb wirkt Tektonik wie ein Kohlendioxidpuffer. Verfügt ein Planet nicht über diesen Ausgleichsmechanismus, kann er schon bei geringer Änderung äußerer Einflüsse, wie dem Ansteigen der Leuchtkraft seiner Sonne, zu heiß werden. Im Gegenzug wäre die Erde im jungen Alter wohl vollständig gefroren gewesen.

Bei einem Exoplaneten lassen sich über Lichtjahre hinweg nur dann Bedingungen für Leben, wie wir es kennen, in der Atmosphäre nachweisen, wenn er sich innerhalb der sogenannten bewohnbaren Zone aufhält. Das ist jener Abstandsreich um einen Stern, in dem auf einem Planeten über längere Zeit solche Temperaturen herrschen, dass auf der Oberfläche Wasser in flüssiger Form – und damit auch Leben – existieren kann. Die Betonung liegt hier auf *kann*, denn ob das wirklich der Fall ist, hängt von den Bedingungen auf dem Planeten ab.

Deshalb ist die Entdeckung eines Exoplaneten in der bewohnbaren Zone seiner Sonne zwar aufregend, aber noch lange kein Beweis dafür, dass dort ein lebensfreundliches Umfeld herrscht. Venus und Mars, die sich gerade am Innen- beziehungsweise Außenrand der bewohnbaren Zone um unsere Sonne

bewegen, sind gute Beispiele für unbewohnbare Himmelskörper innerhalb dieser Region.

Lisa Kaltenegger simuliert im Computer mögliche Atmosphären extrasolarer Planeten und variiert dabei die verschiedenen Parameter wie Masse und Radius des Planeten sowie Leuchtkraft und Temperatur des Sterns. Letztere ist auch deswegen eine sehr kritische Größe, weil sie mit dem Alter des Sterns zunimmt. So hat sich die Leuchtkraft unserer Sonne in den vergangenen zwei Milliarden Jahren um etwa 20 Prozent erhöht.

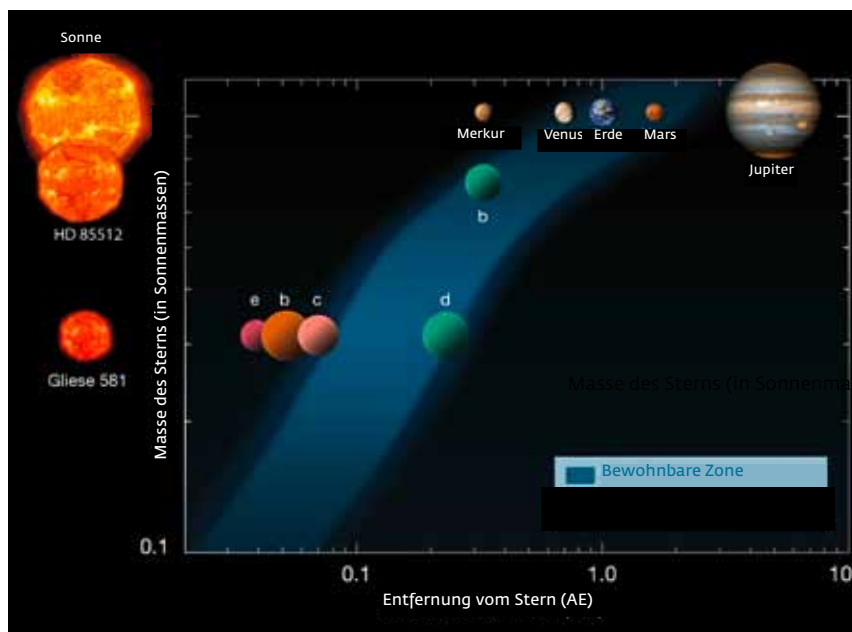
Dieser langsamen Veränderung wird sich der Planet mit seiner Atmosphäre anpassen. Und in vielen Fällen wird ein Exoplanet dadurch nach einer gewissen Zeit aus der bewohnbaren Zone herauswandern: Es wird auf ihm zu heiß. Auch der Erde wird dieses Schicksal nicht erspart bleiben. Allerdings haben wir bis dahin noch einige Hundert Millionen Jahre Zeit.

Astronomen haben seit 1995 rund 800 Exoplaneten entdeckt, fast täglich kommen neue hinzu. Doch bei der überwiegenden Zahl handelt es sich um Gasplaneten, die sich wegen ihrer großen Masse und ihrer Größe einfacher aufspüren lassen. Nur wenige gehören zu den sogenannten Super-Erden. Das sind Planeten, die bis zu zehnmal massereicher sind als die Erde und gesteinsartig sein könnten.

ATMOSPHERENMODELLE FÜR ZWEI HEISSE KANDIDATEN

Zwei solche Super-Erden finden sich an den Rändern ihrer jeweiligen bewohnbaren Zone: der 20 Lichtjahre entfernte Gliese 581d mit sieben Erdmassen und der 36 Lichtjahre entfernte HD 85512b mit 3,6 Erdmassen. Für diese heißen Kandidaten hat Lisa Kaltenegger mit ihrem Computermodell die atmosphärischen Bedingungen ausgerechnet, die Temperaturen zwischen null und hundert Grad ermöglichen würden.

Die Resultate fallen sehr unterschiedlich aus: Auf dem am äußeren Rand der bewohnbaren Zone kreisenden Gliese 581d müsste allein das CO₂ in der Atmosphäre einen Druck von sieben Bar besitzen, damit ihn der Treibhauseffekt ausreichend wärmt. Dagegen müsste der am Innenrand der bewohnbaren Zone



Eine Nische für das Leben: Nicht jeder Stern und nicht jeder Abstand von ihm sind für das Leben geeignet. Jedenfalls nicht für solches, wie wir es kennen. Nur innerhalb der bewohnbaren Zone herrschen günstige Bedingungen, bei denen etwa Wasser flüssig ist. Das gilt beispielsweise für die Exoplaneten Gliese 581d und HD 85512b (grüne Kugeln).

befindliche HD 85512b von einer dichten Wolkenschicht umgeben sein, die das Licht seiner Sonne weitgehend abblockt: „Die Wolken müssten den Planeten kühlen“, sagt Kaltenegger.

Beides verändert den beobachtbaren spektralen Fingerabdruck signifikant und gibt uns einen ersten kleinen Einblick in die spannende Vielfältigkeit der potenziell erdähnlichen Exoplaneten. Rein philosophisch ist es auch reizvoll, sich Lebewesen vorzustellen, die stets unter einer dichten Wolkendecke leben und daher niemals den Himmel und die Sterne sehen. Was hätten sie für ein Weltbild?

Unabhängig davon wird es letztlich nur eine Möglichkeit geben, die Frage nach Leben im Universum zu beantworten: durch Beobachtungen. Lisa Kalteneggers Wunschtraum ist es, bald den ersten spektralen Fingerabdruck eines extrasolaren Gesteinsplaneten zu bekommen, den sie dann mit ihren Atmosphärenmodellen nach Biomarkern absucht. Doch selbst mit der kommenden Generation an Teleskopen wird dieses Vorhaben an die Grenzen der Technik stoßen und die Kreativität der Forscher und Ingenieure auf die Probe stellen.

Die vermutlich beste Möglichkeit, in den nächsten zehn Jahren mit existie-

renden Teleskopen die Atmosphäre eines Exoplaneten zu studieren, bieten sogenannte Transits. Sie finden immer dann statt, wenn wir zufällig auf die Kante eines exoplanetaren Systems schauen. Dann laufen dessen Planeten bei jedem Umlauf einmal vor dem Stern vorbei, und dessen Licht passiert deren Atmosphäre, bevor es zu uns gelangt.

Auf diese Weise hinterlassen die Moleküle ihren spektralen Fingerabdruck im Sternenlicht. Doch darin die Biomarker zu identifizieren gestaltet sich enorm schwierig, weil die Planetenatmosphäre so dünn ist. Auf Satellitenaufnahmen von der Erde kann man das gut nachvollziehen. Lisa Kaltenegger vergleicht den Planeten und seine Atmosphäre mit einem Apfel und seiner Schale.

Vom Jahr 2018 an soll der Nachfolger von *Hubble*, das Weltraumteleskop *James Webb*, ganz neue Möglichkeiten bieten. Doch trotz seines großen Hauptspiegels mit 6,5 Metern Durchmesser erreicht man für erdähnliche Planeten das Limit. Kaltenegger und andere internationale Kollegen haben für ein ähnliches System wie das von Erde und Sonne abgeschätzt, dass man ein Spektrum im Schnitt hundert Stunden lang aufnehmen muss, um die schwachen Biosignaturen zu erkennen.



Ausgezeichnete Astronomin: Lisa Kaltenegger leitet am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie eine Emmy-Noether-Gruppe und ist gleichzeitig Research Associate am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Für ihre Forschungen an Exoplaneten erhielt sie den Heinz Maier-Leibnitz-Preis 2012.

Die Transitdauer beträgt aber nur rund zwölf Stunden – und für einen Umlauf um einen sonnenähnlichen Stern benötigt der Planet rund ein Jahr. Damit hätte man also erst nach zehn Jahren ein Spektrum mit der ausreichenden Qualität aufaddiert. Eine ernüchternde Rechnung, zumal das die voraussichtliche Lebensdauer von *James Webb* überschreitet.

NUR HELLE STERNE LIEFERN SICHERE MESSERGEBNISSE

Mehr Hoffnung bieten Muttersterne, die kleiner, kühler und viel häufiger sind als die Sonne, sogenannte M-Zwerg. Deren bewohnbare Zone liegt näher am Stern als bei uns. Demzufolge benötigen dort Planeten nur ein paar Monate für einen Umlauf. Transits ereignen sich also wesentlich häufiger, was trotz der kürzeren individuellen Transitdauer vor dem Stern pro Erdjahr mehr spektrale Aufnahmen ermöglichen würde.

„Deswegen ist es extrem wichtig, bis zum Start von *James Webb* einen oder mehrere optimale Kandidaten zu finden“, sagt Lisa Kaltenegger. Aus diesem Grund engagiert sie sich in dem amerikanischen Projekt *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*, das erdähnli-

che Planeten bei nahen hellen Sternen suchen soll. Das ist für die nachfolgenden Beobachtungen mit *James Webb* wichtig, weil nur bei hellen Sternen die Chance besteht, ein gutes Spektrum in einem angemessenen Zeitraum zu bekommen.

Auch die Mission *PLANetary Transits and Oscillation of stars (PLATO)*, die sich mit vier anderen Satellitenprojekten in der Auswahlphase der Europäischen Weltraumbehörde ESA befindet, verfolgt dieses Ziel. Deren Start würde aber nicht vor 2022 erfolgen, was die ersten *PLATO*-Resultate in die Zeit nach der nominellen Lebensdauer von *James Webb* legen würde.

Eine zweite Möglichkeit, Lebensspuren auf Exoplaneten zu entdecken,

werden die Großteleskope der nächsten Generation bieten. Hierzu zählt vor allem das European Extremely Large Telescope, für dessen Bau in den chilenischen Anden die Europäische Südsternwarte ESO kürzlich grünes Licht gab. Es wird einen Hauptspiegel von 39 Metern Durchmesser erhalten und soll bis Ende dieses Jahrzehnts in Betrieb gehen.

Doch hier gibt es ein grundsätzliches Problem: „Die Spektrallinien, die wir bei den erdähnlichen Exoplaneten nachweisen wollen, entstehen natürlich auch, wenn das Sternenlicht die Erdatmosphäre durchquert“, erklärt Kaltenegger. Hier wird es entscheidend darauf ankommen, ob es gelingt, die irdischen von extraterrestrischen Spektrallinien zu trennen. Es bleibt also noch viel zu tun, und die Aufgabe ist schwierig. „Aber das macht doch gerade die Forschung interessant“, so Kaltenegger.

Zunächst hat die Forscherin am Heidelberger Max-Planck-Institut eine wissenschaftliche Heimat gefunden, doch die ist mit der Emmy-Noether-Gruppe bis 2015 zeitlich befristet. Auf die Frage, welches ihr Traumziel wäre, hat Kaltenegger keine spezifische Antwort parat. Keine spezielle Universität, kein namhaftes Institut ist ihr Ziel. Nicht einmal der Kontinent ist ihr wichtig. Entscheidend sei für sie die Möglichkeit, möglichst frei ihre Forschung verfolgen zu können, Kontakt mit Studenten zu haben und eine internationale Gruppe leiten zu können.

Wer weiß, vielleicht gehört sie dereinst zu jenem Team, das die ersten Lebensspuren auf einem fernen Himmelskörper entdeckt. Was werden wir dann mit diesen Erkenntnissen anfangen? Und welche neuen, spannenden Fragen werden sich damit gleichzeitig auftun? ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Unter den rund 800 bisher entdeckten Exoplaneten bieten allenfalls drei lebensfreundliche Bedingungen.
- Mithilfe der Spektralanalyse wollen die Astronomen eines Tages Lebensspuren auf Exoplaneten nachweisen. Doch die Beobachtung solcher Biomarker geht an die instrumentellen Grenzen. Und: Wie könnte die Signatur im Spektrum aussehen?
- Dazu simuliert Lisa Kaltenegger im Computer mögliche Atmosphären extrasolarer Planeten und variiert dabei die verschiedenen Parameter wie Masse und Radius des Planeten sowie Leuchtkraft und Temperatur des Sterns.