

**PLANETARE**

**NACHBARN**

PLANETARE NACHBARN

# AUF DER SUCHE NACH EINER ZWEITEN ERDE

ANDREAS QUIRRENBACH

**In den Tiefen des Weltraums lassen sich erstaunliche Entdeckungen machen. Dazu zählen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems – sogenannte Exoplaneten. Doch ist auch eine zweite Erde dabei? Und wie werden neue Sterne und Planeten geboren? Heidelberger Astronominnen und Astronomen entlocken dem All seine Geheimnisse mit hochpräzisen astronomischen Instrumenten.**

# W

Wir leben auf dem dritten Planeten eines ganz gewöhnlichen Sterns, der das Zentrum einer großen Galaxie in einer Entfernung von etwa 27.000 Lichtjahren umkreist. Unsere Erde ist viereinhalb Milliarden Jahre alt und erhält von der Sonne gerade so viel Wärme, dass die Temperatur auf der Erdoberfläche die Existenz flüssigen Wassers zulässt. Damit ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Leben gegeben. Wie viele solcher Systeme gibt es in unserer Milchstraße? Wie entstehen sie, und wie entwickeln sie sich? Wo sind unsere nächsten Nachbarn? Mit diesen Fragen beschäftigt sich die noch junge wissenschaftliche Disziplin zur Erforschung von Exoplaneten. Unsere Arbeitsgruppe in der Landessternwarte auf dem Königstuhl in Heidelberg nimmt dabei vor allem solche Sterne in den Blick, die viel größer oder viel kleiner als unsere Sonne sind.

## „Und sie bewegt sich doch“

„Eppur si muove“ – „Und sie bewegt sich doch“, soll Galilei gemurmelt haben, nachdem er vor der Inquisition von seiner Hypothese abschwören musste, die Erde bewege sich um die Sonne. Heute lernt jedes Grundschulkind, dass Galileo recht hatte: Es ist – dem ersten Anschein zum Trotz – nicht die Sonne, die um die Erde kreist. Es sind die Planeten, die ihre Bahnen um die Sonne ziehen. Aber stimmt das wirklich? Es stimmt – aber nur fast.

Nach den Gesetzen der Mechanik gibt es zu jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft: So wie die Sonne die Bahn der Erde bestimmt, zwingt auch die Erde die Sonne auf eine Bahn. Die Sonne ist allerdings ungefähr 300.000 Mal schwerer als die Erde und ihre Bahn somit 300.000 Mal kleiner. Wenn es die anderen Planeten nicht gäbe, beschreibe die Sonne aufgrund der Anziehungskraft der Erde im Laufe eines Jahres einen Kreis mit einem Radius von 450 Kilometern. Den größten Einfluss auf die Sonne hat der Riesenplanet Jupiter, aber auch alle acht Planeten unseres Sonnensystems zusammengenommen bewegen die Sonne um nicht viel mehr als ihren eigenen Radius, das sind etwa 700.000 Kilometer. In den Maßstäben des Weltraums gemessen ist das nicht viel. Aber immerhin, sie bewegt sich – die Sonne.

Diesen Umstand machen wir uns zunutze, wenn wir nach Planeten suchen, die um andere Sterne kreisen: Auf ihren

Bahnen um den Schwerpunkt ihres jeweiligen Planetensystems bewegen sich die Sterne in periodischem Wechsel auf uns zu und wieder von uns weg. Diese kleinen Änderungen ihrer Geschwindigkeit können wir mit hochpräzisen astronomischen Instrumenten messen. Wir führen gewissermaßen regelmäßige kosmische Radarkontrollen an einigen Hundert Sternen durch. Dafür benötigen wir keinen Sender, denn die Sterne selbst senden Licht mit genau bestimmbar Eigenschaften aus. Die Konstruktion der Spektrographen indes, die uns als Empfänger dienen, ist eine Spezialdisziplin des astronomischen Instrumentenbaus. Die Heidelberger Landessternwarte, die zum Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg gehört, zählt hier zu den weltweit führenden Institutionen.

## Auf der Suche nach unseren nächsten Nachbarn

Um uns der Frage zu nähern, ob und wie häufig erdähnliche Planeten im Universum vorkommen, haben wir uns Ende des Jahres 2010 mit zehn weiteren wissenschaftlichen Instituten in Deutschland und Spanien zum CARMENES-Konsortium zusammengeschlossen. CARMENES ist das Akronym für „Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs“. Der vollständige Projektname ist zugegebenermaßen etwas sperrig, beschreibt unsere wissenschaftlichen Zielsetzungen und Methoden jedoch in komprimierter Form recht genau.

Die Buchstaben „M“ und „E“ in der Mitte der Kurzbezeichnung stehen für die Objekte unseres Interesses: Als „M-Zwerge“ bezeichnen wir Astronomen Sterne, die weniger als eine halbe Sonnenmasse besitzen. Sie sind sehr leuchtschwach, weil die Fusion von Wasserstoffkernen zu Helium in ihrem Inneren nur langsam abläuft. Etwa zwei Drittel aller Sterne gehören dieser M-Klasse an, darunter auch Proxima Centauri, der Stern, der unserer Sonne am nächsten ist. Der Buchstabe „E“ steht für die erdähnlichen Planeten, die wir aufspüren wollen. Hierzu eignen sich M-Zwerge besonders gut, weil sie sich aufgrund ihrer geringen Masse stärker bewegen, wenn ein Planet an ihnen zieht. Darüber hinaus ist bei M-Zwergen der Abstand kleiner, der lebensfreundliche Bedingungen zulässt. Ein Beispiel: Auf dem Planeten Merkur erreicht die Mittagstemperatur lebensfeindliche 430 °C – M-Zwerge hingegen strahlen so viel schwächer als die Sonne, dass auf ihren Planeten selbst dann noch angenehme Temperaturen herrschen, wenn sie noch näher an ihrem Mutterstern sind. Nach den Kepler'schen Gesetzen der Planetenbewegung wird die Bahngeschwindigkeit umso größer, je kleiner der Abstand zum Mutterstern ist. Auch dieser Umstand hilft uns bei der Suche nach relativ kleinen Planeten. Unter all diesen Voraussetzungen konnten wir uns das realistische Ziel setzen, bei den M-Zwergen Planeten zu finden, die der Erde ähnlich sind.

# „Wir führen gewissermaßen regelmäßige Radarkontrollen an einigen Hundert Sternen durch.“

## Ein neues Instrument

Für eine solche Suche gab es allerdings kein geeignetes Instrument. Die herkömmlichen Instrumente (Spektrographen) zur Aufnahme von Licht verschiedener Wellenlänge, sind für Messungen von Sternen gebaut, die der Sonne ähnlich sind. Sie geben ihr Licht hauptsächlich im gelb-orangen Spektralbereich ab. Wir mussten deshalb zunächst ein Instrument bauen, mit dem das tiefröte und nah-infrarote Licht von M-Zwergen – sie werden deshalb auch „Rote Zwerge“ genannt – analysiert werden kann. Damit haben wir Neuland betreten, nur das grundlegende Konstruktionsprinzip sogenannter hochauflösender

Échelle-Spektrographen konnten wir aus bereits vorangegangenen Projekten übernehmen.

Bestärkt wurde unser Vorhaben durch einen Ideenwettbewerb, den just das Calar-Alto-Observatorium ausgeschrieben hatte, um neue Instrumente und Beobachtungsprogramme zu entwickeln. Der Berg Calar Alto gehört zur südspanischen Provinz Andalusien. Auf ihm steht das deutsch-spanische Astronomiezentrum, an dessen größtem Teleskop wir unsere Forschung betreiben. Mit einem Spiegeldurchmesser von 3,5 Metern gehört dieses Teleskop der „oberen Mittelklasse“ an. Es ist nicht so lichtstark

wie die Großteleskope mit einem Durchmesser von acht bis zehn Metern. Dafür ist es nicht ganz so stark von Astronomen überbucht – und war damit ideal geeignet für unser Vorhaben, mindestens 300 Sterne jeweils mindestens 50 Mal zu beobachten und dabei mehr als 15.000 Spektren aufzunehmen. Jede Beobachtung dauert im Schnitt etwa eine halbe Stunde, so dass wir circa 750 klare Beobachtungsnächte benötigen würden. All das passte genau zum Projektwettbewerb des Calar Alto, den wir mit unserem Vorschlag gewinnen konnten.

Anfang des Jahres 2011 begannen wir an der Landessternwarte mit der Konstruktion des für den roten Spektralbereich optimierten CARMENES-Spektrographen. Die Landessternwarte in Heidelberg übernahm außerdem die Projektleitung. Der Nah-Infrarot-Spektrograph wurde im Astrophysikalischen Institut Andalusiens in Granada gebaut; wichtige Beiträge kamen von unserem Nachbarn auf dem Königstuhl, dem Max-Planck-Institut für Astronomie. Die Partner in Göttingen, Hamburg, Tautenburg, Barcelona, Madrid und Teneriffa steuerten Software und kleinere Komponenten bei. Im Sommer 2015 konnten wir mit der Integration auf dem Calar Alto beginnen und schon im Herbst „First Light“ begehen, also die ersten Spektren von Sternen aufnehmen. Pünktlich zum Jahresende wurde das betriebsbereite Instrument zur wissenschaftlichen Nutzung freigegeben.

#### Entdeckung zweier Planeten

In den ersten Betriebsjahren von 2016 bis 2020 konnte CARMENES alle unsere Erwartungen erfüllen, teils sogar deutlich übertreffen. Unsere Suche nach einer „Zweiten Erde“ wurde von Erfolg gekrönt: Wir entdeckten zwei Planeten, die einen recht nahen und besonders leichten M-Zwerg umkreisen, den sogenannten „Teegardens Stern“. Beide Planeten sind nur wenig schwerer als die Erde. Sie befinden sich in einem Abstand von ihrem Mutterstern, der die Existenz flüssigen Wassers an der Oberfläche ermöglichen könnte. Der innere der beiden Planeten ist von allen derzeit bekannten Exoplaneten derjenige, der hinsichtlich Masse und Temperatur der Erde am ähnlichsten ist. Völlig offen ist allerdings, ob wir daraus schließen können, dass auch seine anderen Eigenschaften denen der Erde nahekommen, ob er also beispielsweise eine Atmosphäre und ein Klima besitzt, in dem Leben entstehen könnte.

So ähnlich die Planeten von Teegardens Stern unserer Erde auch sein mögen – der Stern selbst unterscheidet sich sehr von unserer Sonne. Diese Unterschiede könnten gravierende Konsequenzen haben, weil M-Zwerg wie Teegardens Stern ihre planetaren Begleiter viel stärker und länger mit hochenergetischen Teilchen, starker ultravioletter Strahlung und Röntgenstrahlung bombardieren. Eruptionen der Sonne rufen bei uns auf der Erde Polarlichter hervor, gelegentlich kann es auch zu besorgniserregenden Störungen

„Kommen sich zwei Planeten zu nahe, kann einer von beiden aus dem System hinausgeschleudert werden: Er wird zu einem einsamen Wanderer in der Milchstraße.“

der Kommunikation und Energieversorgung kommen – ähnliche, aber viel heftigere Ereignisse, die sich auf M-Zwergen ereignen, können die Atmosphären der sie umkreisenden Planeten völlig zerstören. Die Aktivität dieser Sterne besser zu verstehen, ist ein weiteres wichtiges Ziel der CARMENES-Kollaboration.

#### **Auch Proxima Centauri mit erdähnlichem Begleiter**

Dank der Entdeckungen von CARMENES wissen wir heute, dass viele der sonnennahen M-Zwerge erdähnliche Planeten besitzen. Auch Proxima Centauri, unser nächster, am Südhimmel stehender Nachbarstern, besitzt einen erdähnlichen Begleiter – die Teleskope der Europäischen Südsternwarte in Chile haben ihn entdeckt.

In jüngerer Zeit kamen noch viele weitere besonders interessante Kandidaten hinzu, die mit einer anderen Beobachtungstechnik aufgespürt wurden: Seit April 2018 durchmustern vier Weitwinkel-Kameras der NASA-Mission TESS nahezu den kompletten Himmel und messen sehr präzise jeweils einen Monat lang die Helligkeit aller Sterne in einem Sektor. Dazu muss man wissen, dass ein Planet, wenn er auf seiner Bahn vor seinem Mutterstern herzieht, für eine gewisse Zeit einen Teil des Sternenlichts blockiert – so, wie der Mond die Sonne bei einer Sonnenfinsternis verdunkelt. Da der Mond sehr nahe an der Erde ist, kann er die Sonne völlig verdecken. Exoplaneten hingegen verdecken immer nur einen kleinen Teil ihres Muttersterns. Hinzu kommt, dass Bedeckungen nur dann zu beobachten sind, wenn wir uns zufällig fast genau in der Bahnebene befinden – blicken wir auf den Pol eines Systems, umkreisen die Planeten den Stern, ohne ihn je zu bedecken. Deswegen kann man mit dieser Methode nur einen kleinen Teil aller existierenden Planeten finden. Diejenigen aber, die man findet, sind besonders aufschlussreich.

Aus den TESS-Daten lässt sich beispielsweise der Radius dieser Planeten bestimmen – je größer der Planet, desto stärker fällt die Verdunkelung aus. Hier kommt CARMENES wieder ins Spiel: Wir setzen M-Zwerge, bei denen TESS einen Planetenkandidaten gefunden hat, auf unsere Beobachtungsliste und messen, wie sich der Mutterstern bewegt. Zeigen die Daten die erwarteten periodischen Schwankungen, können wir nicht nur die Existenz des Planeten bestätigen, sondern auch seine Masse bestimmen. Denn die beobachtete Amplitude der Geschwindigkeit ist proportional zur Masse des Planeten, der am Stern zieht. Damit haben wir wieder eine neue Art der Information gewonnen: Aus dem Radius lässt sich das Volumen des Planeten errechnen, und die Kombination von Masse und Volumen ergibt die Dichte. Gemeinsam sind TESS und CARMENES so imstande, die Zusammensetzung von Planeten zu messen und zwischen erdartigen Gesteinsplaneten und weniger dichten Planeten mit ausgedehnten gasförmigen Hüllen zu unterscheiden.

#### **Die Geburt von Sternen**

Mit CARMENES beobachten wir gezielt M-Zwerge. Zugleich haben wir ein Programm, das sich mit Riesensternen beschäftigt. Sie haben typischerweise einen Durchmesser, der zehnmal so groß ist wie der Durchmesser der Sonne. Auch unsere Sonne wird sich irgendwann zu einem solchen Riesen aufblähen: in fünf Milliarden Jahren etwa, wenn der Vorrat an Wasserstoff in ihrem Kern verbraucht und vollständig in Helium umgewandelt worden ist. Das wirft die Frage auf: Was passiert mit einem Planetensystem in dieser späten Entwicklungsphase des Zentralsterns? Allgemeiner ausgedrückt: Was können wir über das Werden und Vergehen von Planetensystemen sagen?

Was wissen wir schon darüber? Wir wissen, dass sich in der Scheibe unserer Milchstraße eine große Menge an kaltem Gas befindet, das mit mikroskopisch kleinen Staubkörnern durchmischt ist. Wenn sich in diesem kalten Gas Klumpen bilden und die Klumpen immer weiter abkühlen, können sie unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Dann wird ihr Zentrum immer dichter, und es heizt sich auf. Schließlich zündet im Kern die Fusion von Wasserstoff zu Helium: Ein neuer Stern ist geboren. Auf diesen jungen Stern fallen aus der Hülle weiterhin Gas und Staub, und aufgrund des ihm eigenen Drehimpulses ordnet sich

#### **Landessternwarte Königstuhl**

Die Landessternwarte Königstuhl (LSW) wurde am 20. Juni 1898 als „Großherzogliche Bergsternwarte“ durch Großherzog Friedrich I. von Baden eingeweiht. Sie befindet sich auf dem Westgipfel des Königstuhls und verfügt über sechs mit Teleskopen ausgestattete Beobachtungskuppeln. Seit 2005 ist sie nicht mehr Landesinstitut, sondern – zusammen mit dem Astronomischen Rechen-Institut (ARI) und dem Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) – Teil des Zentrums für Astronomie (ZAH) der Universität Heidelberg. Geleitet wird sie von Prof. Dr. Andreas Quirrenbach. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Landessternwarte forschen auf den Gebieten der stellaren, extragalaktischen und theoretischen Astrophysik und beteiligen sich an der Entwicklung und am Bau astronomischer Instrumente. Arbeitsgruppen der Sternwarte beschäftigen sich mit Planeten außerhalb des Sonnensystems, metallarmen und heißen Sternen, der Hochenergie-Astrophysik sowie aktiven Galaxien. Darüber hinaus sind die LSW-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler an internationalen Projekten wie dem Large Binocular Telescope oder dem H.E.S.S.-Teleskop für die Beobachtung höchstenergetischer Gammastrahlen beteiligt.

[www.lsw.uni-heidelberg.de](http://www.lsw.uni-heidelberg.de)

# „Unsere Suche nach einer ‚Zweiten Erde‘ wurde von Erfolg gekrönt.“

dieses Material zu einer rotierenden Scheibe an. Körner aus Staub und Eis verklumpen zu immer größeren Brocken, von denen einige zu Planeten heranwachsen. Überbleibsel dieser Prozesse, die Planetensysteme entstehen lassen, sehen wir heute noch im Sonnensystem in Form von Asteroiden und Kometen.

Planetensysteme entstehen also stets gemeinsam mit ihren Muttersternen. Sie haben eine aufregende, aber nicht immer gewaltfreie Jugend. Die einzelnen Planeten ziehen sich nämlich gegenseitig an, beeinflussen gegenseitig ihre Bahnen und tauschen Energie sowie Drehimpuls aus. Kommen sich dabei zwei Planeten zu nahe, kann einer von beiden aus dem System hinausgeschleudert werden: Er wird zu einem einsamen Wanderer in der Milchstraße. Die verbliebenen Planeten arrangieren ihre Bahnen neu, bis sie wieder eine stabile Konfiguration erreicht haben. Die Wechselwirkung mit dem Gas der Scheibe in der Entstehungszeit hinterlässt ähnliche Spuren.

Bei unseren Messungen an Riesensternen begegneten uns einige Systeme, in denen die Umlaufperioden zweier Planeten in einem auffälligen ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen. Der Stern „7 Ursae Maioris“ etwa besitzt zwei Planeten: Der eine Planet macht genau vier Umläufe, während der andere den Stern dreimal umrundet. Noch ungewöhnlicher ist das System von „v Ophiuchi“. Dort haben zwei Planeten, die jeweils mehr als 20 Mal so schwer sind wie Jupiter, Umlaufzeiten, die sich wie 6:1 verhalten. Die Dynamik solcher Systeme vollziehen wir mit Computersimulationen nach. Dabei lernen wir auch viel über die Bedingungen, die bei ihrer Entstehung geherrscht haben müssen.

## Verdampfende Ozeane

Zurück zur Ausgangsfrage: Was wird mit uns auf der Erde passieren, wenn sich die Sonne zu einem Riesenstern aufbläht? Bewohnbar wird die Erde schon zu einem viel früheren Zeitpunkt nicht mehr sein: Über Zeiträume von



**PROF. DR. ANDREAS QUIRRENBACH** ist seit 2006 als Professor an der Fakultät für Physik und Astronomie sowie als Leiter der Landessternwarte an der Universität Heidelberg tätig. Nach dem Studium der Physik in Bonn und Heidelberg entwickelte er im Zusammenhang mit seiner Dissertation, die am Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie entstand, seinen Schwerpunkt in astronomischen Präzisionsmessungen. Als Feodor Lynen-Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung forschte er am US Naval Observatory in Washington, DC (USA); anschließend war er Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. 1997 erhielt er einen Ruf an die University of California in San Diego (USA), von wo er 2002 an die Universität Leiden (Niederlande) wechselte.

Kontakt: A.Quirrenbach@lsw.uni-heidelberg.de

# THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

ANDREAS QUIRRENBACH

Our Earth orbits the Sun at a distance that is conducive to the existence of liquid surface water, an important prerequisite for life as we know it. How frequent are such planets? How do they form and evolve? And where are our nearest neighbours? Our group at the Königstuhl State Observatory tries to find answers to these questions by looking at stars that are either much smaller or much larger than our Sun.

Using a method called “radial velocity technique”, we measure the motion of the host star around the centre of mass of a planetary system to ascertain the presence of these planets and determine their masses. These delicate measurements are a bit easier for stars with low masses, and for planets in close orbit around them. Such planets do not get very hot if the star is less luminous than the Sun. Small and faint stars known as “M dwarfs” are thus particularly suited for the search for potentially habitable planets.

Together with ten other institutions in Germany and Spain, we have formed the CARMENES consortium, which has constructed a pair of purpose-built spectrographs for the 3.5m telescope on Calar Alto in Southern Spain. Thanks to this instrument we have discovered a number of fairly small planets. A pair of them, orbiting a host known as “Teegarden’s star”, have masses and temperatures rather similar to Earth. We are also measuring the masses of planets that were discovered by NASA’s TESS mission through transits in front of their host stars. By combining our masses with the radii known from the depth of the transits, we can determine their mean densities and thus begin to understand their composition.

In a separate project, we are looking for planets of giant stars that have already converted all nuclear hydrogen fuel in their cores into helium. These studies help us understand the processes that shape the formation of planetary systems, and they presage the fate of our solar system when the Sun will turn into a giant star 5 billion years from now. ●



PROF. DR ANDREAS QUIRRENBACH joined Heidelberg University in 2006 as a professor at the Faculty of Physics and Astronomy and as director of the State Observatory. He studied physics in Bonn and Heidelberg and, in the course of writing his doctoral thesis at the Max Planck Institute for Radio Astronomy in Bonn, began to specialise in astronomical precision measurements. As a Feodor Lynen Fellow of the Humboldt Foundation, he conducted research at the US Naval Observatory in Washington, D.C. (USA), then worked at the Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics in Garching. In 1997 he accepted a chair at the University of California in San Diego (USA), and in 2002 transferred to Leiden University (Netherlands).

Contact: A.Quirrenbach@  
lsw.uni-heidelberg.de

**“We basically perform regular radar checks on several hundreds of stars.”**

### Von Kalendergrundlagen zu Satellitenmissionen

Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist die größte universitäre Einrichtung für astronomische Forschung und Lehre in Deutschland. Es wurde im Jahr 2005 als Zusammenschluss der bisherigen Landesforschungseinrichtungen Astronomisches Rechen-Institut (ARI) und Landessternwarte Königstuhl (LSW) mit dem bereits existierenden universitären Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) gegründet. Die Forschung am ZAH umfasst einen breiten Themenbereich von Kosmologie und Gravitationslinsen über Galaxienentwicklung und Stelldynamik bis hin zu Sternentstehung, Astrometrie und Satellitenmissionen.

[www.zah.uni-heidelberg.de](http://www.zah.uni-heidelberg.de)

Noch dramatischer als für die Erde wird die Situation für die inneren Planeten: Wenn die Sonne die Riesephase erreicht, wird sie sich so weit ausdehnen, dass Merkur und Venus von ihr verschluckt werden – und vielleicht auch die Erde. Gleichzeitig wird der Sonnenwind so stark wehen, dass der Fixstern rund die Hälfte seiner Masse verliert. Das wird auch das Gleichgewicht des äußeren Sonnensystems durcheinanderbringen. Die Planeten werden in immer größeren Abständen um die Sonne kreisen, und es wird dazu kommen, dass kleine Objekte – und eventuell auch einer oder gar mehrere Planeten – aus dem System hinauskatapultiert werden. Die Details dieser Prozesse sind noch kaum erforscht. Mit unseren Beobachtungen von Riesensternen hoffen wir, mehr Informationen über die Entwicklungswege von Planetensystemen zu gewinnen.

Am Ende des Lebens unserer Sonne wird sie ihre äußere Hülle vollständig verloren haben. Sie wird zu einem „Weißen Zwerg“ werden, kaum größer als die Erde. Ihre innere Energiequelle ist versiegt, während der Jahrmilliarden wird sie immer weiter abkühlen. Sollte die Erde zu diesem Zeitpunkt noch existieren, wird sie einen eisigen Stern in einer Milchstraße umkreisen, deren andere Sterne ebenfalls längst erloschen sind. ●

Milliarden Jahren nimmt die Strahlung der Sonne stetig zu. Damit geht ein langsamer Klimawandel einher. Er wird seit vielen Hundert Jahrmillionen von einer ebenso langsamen natürlichen Abnahme der Treibhausgase in der Erdatmosphäre kompensiert. Letztlich jedoch wird sich die Erde so erwärmen, dass die Ozeane verdampfen.

#### Herausgeber

Universität Heidelberg  
Der Rektor  
Kommunikation und Marketing

#### Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Peter Comba (Vorsitz)  
Prof. Dr. Beate Ditzen  
Prof. Dr. Nikolas Jaspert  
Prof. Dr. Marcus A. Koch  
Prof. Dr. Alexander Marx  
Prof. Dr. Dr. h.c. Thomas Pfeiffer  
Prof. Dr. Joachim Wambsganz  
Prof. Dr. Reimut Zohlhörer

#### Redaktion

Marietta Fuhrmann-Koch  
(verantwortlich)  
Mirjam Mohr (Leitung)  
Claudia Eberhard-Metzger

#### Layout

KMS TEAM GmbH, München

#### Druck

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen

#### Auflage

6.000 Exemplare

#### ISSN

0035-998 X

#### Vertrieb

Universität Heidelberg  
Kommunikation und Marketing  
Grabengasse 1, 69117 Heidelberg  
Tel.: +49 6221 54-19026  
[ruca@uni-heidelberg.de](mailto:ruca@uni-heidelberg.de)

Das Magazin kann kostenlos unter oben genannter Adresse abonniert werden.

Im Internet ist es verfügbar unter:

<https://www.uni-heidelberg.de/de/presse-medien/publikationen/forschungsmagazin>

<http://heiu.uni-heidelberg.de/journals/index.php/ruptocarola>