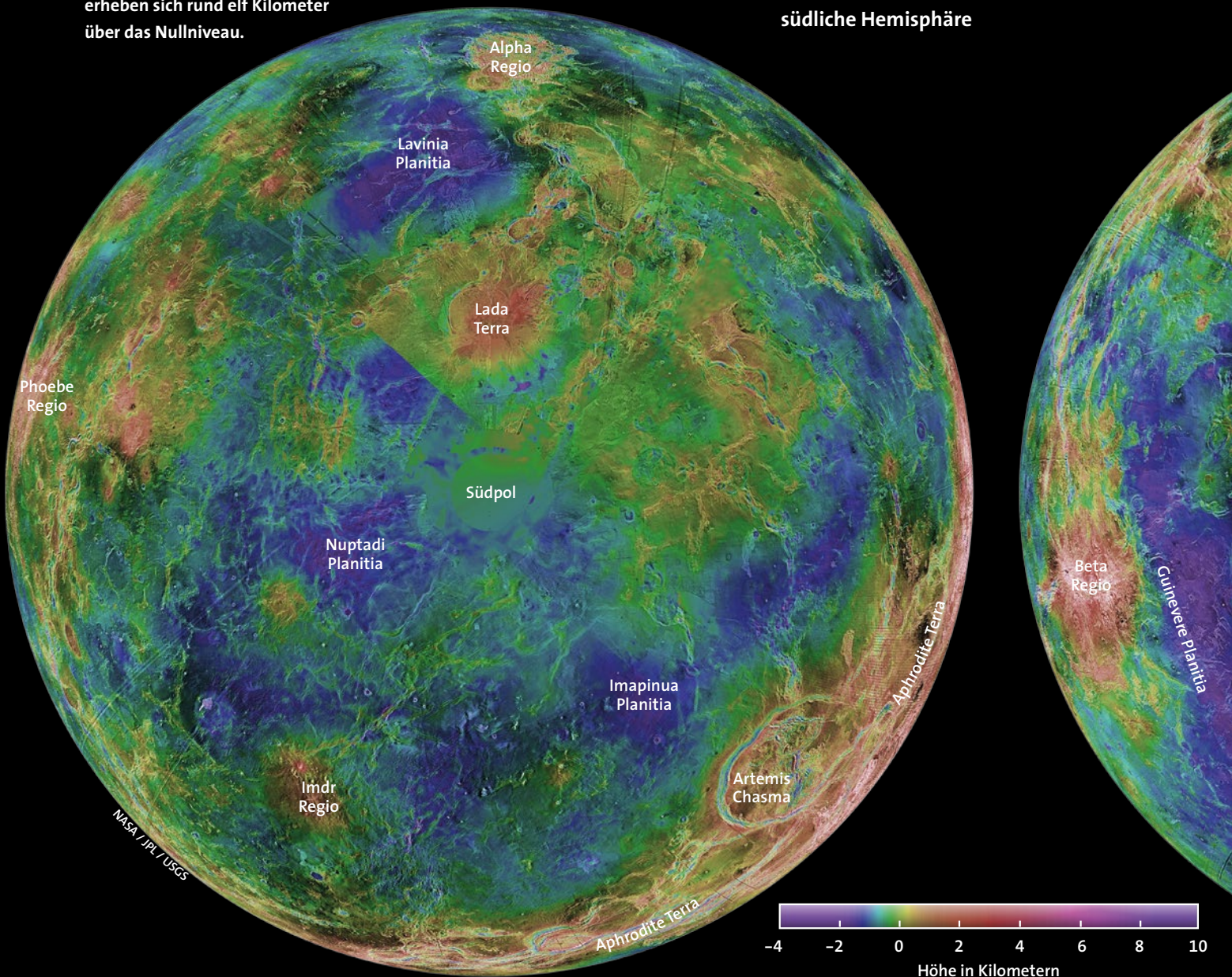


Venus

Der Exoplanet nebenan

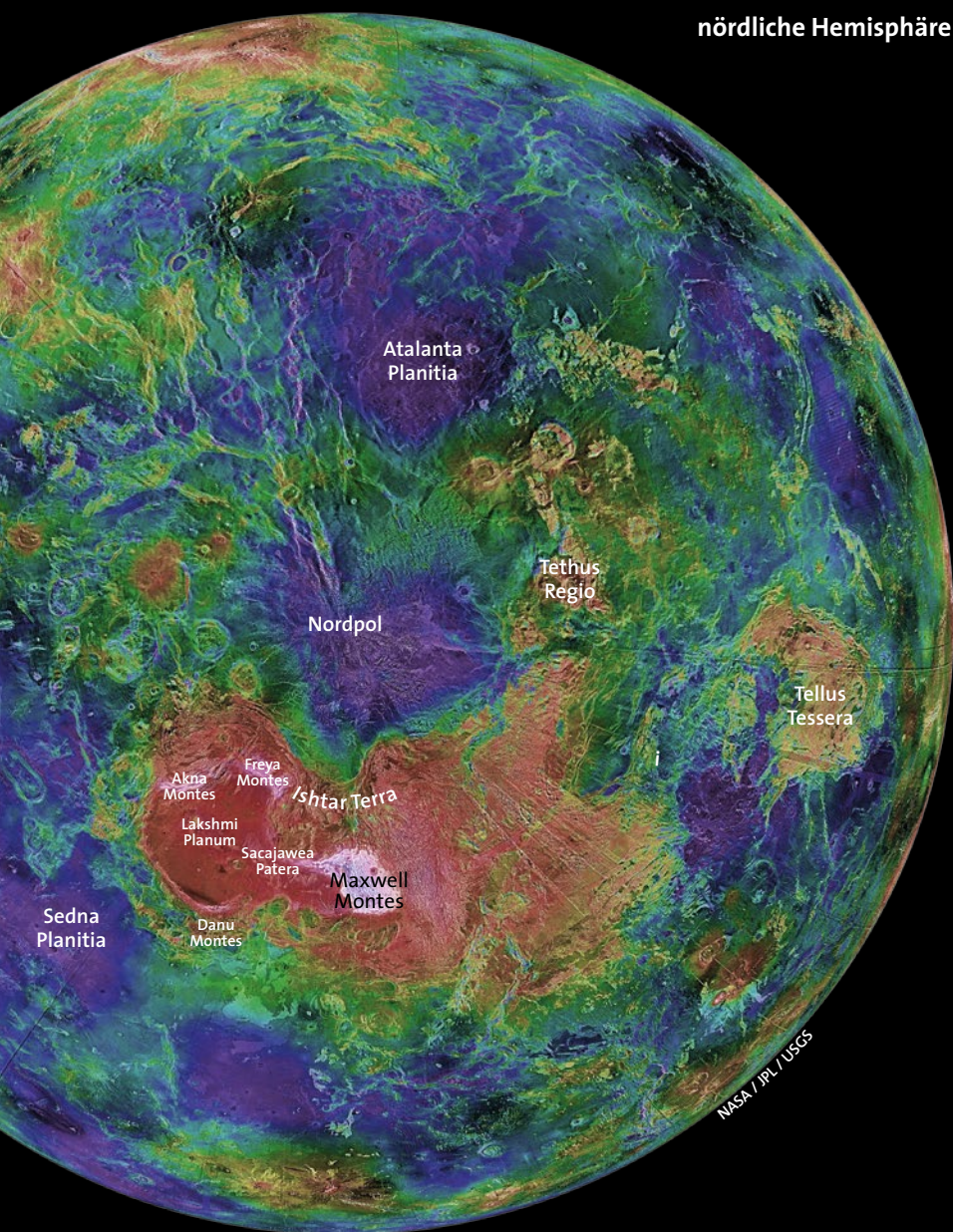
Aus den Radardaten der NASA-Raumsonden Pioneer Venus Orbiter und Magellan wurden diese Karten der Venusoberfläche erstellt. Die wichtigsten Formationen auf der Oberfläche sind beschriftet. Das festgelegte Nullniveau der Venus bezieht sich auf einen mittleren Planetenradius von 6051,84 Kilometern. Das höchste Bergmassiv, die Maxwell Montes auf der Nordhalbkugel, erheben sich rund elf Kilometer über das Nullniveau.

südliche Hemisphäre



Die Venus ist so groß wie die Erde und begann unter ähnlich lebensfreundlichen Bedingungen. Heute ist sie eine felsige Gluthölle. Forscher versuchen intensiv, die unterschiedliche Entwicklung zu verstehen – denn die Erkenntnisse weisen weit über unser eigenes Sonnensystem hinaus.

Von M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar und Stephen R. Kane



nördliche Hemisphäre

Als 1982 die neu gewählte US-Regierung um Präsident Ronald Reagan umfangreiche Kürzungen bei der US-Weltraumforschung beschloss, gehörte die geplante NASA-Mission »Venus Orbital Imaging Radar« (VOIR) zu den Opfern. Doch die Abteilung für Planetologie am Massachusetts Institute of Technology und am Jet Propulsion Laboratory der NASA griff zu unkonventionellen Methoden: Schnell kratzten die Wissenschaftler von anderen Missionen übrig gebliebene Teile zusammen und konstruierten daraus eine preiswertere Raumsonde. Nur noch 680 Millionen US-Dollar kostete der so konzipierte Magellan-Orbiter, der 1989 zur Venus startete.

Im Jahr 1990 war er am Ziel. In den darauf folgenden fünf Jahren lieferten die Instrumente Radarbilder der gesamten Planetenoberfläche, Daten über Schwerkraftanomalien und eine topografische Karte der Venus. Magellan war die jüngste in einer langen Reihe sowjetischer und US-amerikanischer Missionen zu unserem Nachbarplaneten. Nachdem die Sonde 1994 planmäßig in der Atmosphäre des Planeten verglüht war, endete mit ihr allerdings auch das Interesse der NASA an weiteren Flügen zu dem erdgroßen Himmelskörper. Seither haben Planer gut zwei Dutzend Vorschläge für neue Missionen eingereicht – genehmigt wurde keiner. Die von Magellan gesammelten Daten liefern bis heute das beste Kartenmaterial.

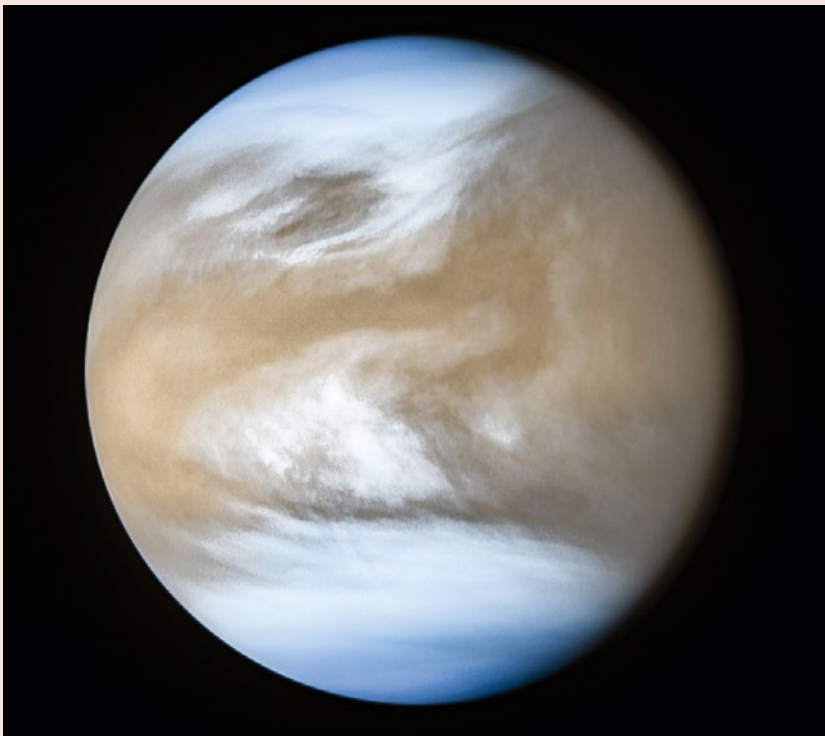
In der Zwischenzeit haben die europäischen und japanischen Raumfahrtagenturen mit erfolgreichen Missionen wie Venus Express und Akatsuki das Spielfeld

IN KÜRZE

- Zur Zeit ihrer Entstehung sollen auf Venus und Erde vergleichbare Bedingungen geherrscht haben. Letztere entwickelte sich zu einem lebensfreundlichen Planeten, während Venus zur Gluthölle wurde.
- Unser Nachbarplanet weist noch immer aktiven Vulkanismus auf, und es gibt Hinweise auf eine mögliche Plattentektonik.
- Die Antworten auf die Frage, warum sich die Venus so völlig anders als die Erde entwickelt hat, können helfen, die vielen Exoplaneten bei anderen Sternen zu verstehen.

Der Anblick der Venus

Betrachtet man unsere innere Nachbarin Venus im Teleskop, so zeigt sich der Planet dem Auge als grellweiße Sichel ohne jegliche weitere Merkmale. Die permanente Wolkendecke der Venus, die überwiegend aus konzentrierter Schwefelsäure besteht, reflektiert im sichtbaren Licht den größten Teil der auf sie treffenden Sonnenstrahlung zurück ins All. Fotografiert man die Venus dagegen im infraroten oder ultravioletten Licht, so enthüllt sich dem Kameraauge eine hochdynamische und wechselhafte Atmosphäre mit ausgeprägten Wolkenstrukturen und Stürmen. Dieses Bild wurde aus Daten der japanischen Raumsonde Akatsuki vom US-amerikanischen Amateurbildbearbeiter Kevin Gill zusammengesetzt. Es kombiniert Bildinformationen im ultravioletten Spektralbereich (weiße und blaue Farbtöne) mit Bilddaten aus dem infraroten Spektralbereich (bräunliche Farbtöne). Die Kombination zeigt die Venus am 17. Mai 2016 und erlaubt einen Einblick in die Struktur der Venusatmosphäre.



Kevin Gill / JAXA / ISAS / DARTS / Kevin M. Gill (www.flickr.com/photos/kevinmgill/24771639777) / CC BY 2.0 (creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode)

betreten. Diese führten zu Durchbrüchen beim Verständnis der Atmosphäre und brachten zusammen mit neuen Analysen der Magellan-Messungen Erkenntnisse, auf Grund derer einige Lehrbücher umgeschrieben werden müssen. Die Venus scheint vulkanisch aktiv zu sein, und es gibt sogar Hinweise auf eine beginnende Plattentektonik. Solche Vorgänge halten viele Wissenschaftler für eine Voraussetzung für die Entstehung von Leben. Nicht unumstrittene theoretische Modelle deuten auch darauf hin, dass die Venus relativ lange flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche gehalten hat.

Diese Erkenntnisse fallen mit einer weiteren erstaunlichen Entwicklung in der Astronomie zusammen: der Entdeckung von Tausenden von Exoplaneten in

anderen Sonnensystemen. Viele sind etwa so groß und so weit von ihren Sternen entfernt wie die Venus. Alles, was wir über den Planeten nebenan erfahren, könnte das Verständnis solcher unzugänglich fernen Welten verbessern. Wenn wir herausfinden, ob und wann auf der Venus lebensfreundliche Bedingungen geherrscht haben, können wir auch die Chancen auf Leben auf den venusähnlichen Himmelskörpern in der übrigen Milchstraße besser einschätzen.

Die meisten der bisher entdeckten Exoplaneten wurden mit der Transitmethode gefunden. Dabei untersuchen Astronomen verräterische Helligkeitsschwankungen von Sternen, die auftreten, wenn Planeten vorbeiziehen. Die Technik liefert deren Größe, aber die allein sagt noch

nicht viel aus. Würde ein außerirdischer Beobachter unser Sonnensystem mit der Transitmethode betrachten, erschienen Venus und Erde fast identisch. Dabei ist Erstere zumindest für uns bekannte Lebensformen völlig unbewohnbar, während die Erde seit rund vier Milliarden Jahren komplexe Ökosysteme beherbergt.

Wir können zwischen ähnlich großen Planeten näher differenzieren, indem wir ihre Abstände zu ihren Sternen messen. Die »habitable Zone« ist die Region, in der ein felsiger Planet zumindest theoretisch flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche haben könnte (siehe auch SuW 11/2019, S. 38). Bei der Erde ist das offensichtlich der Fall. Doch auch die Venus befand sich früher in jenem Bereich – womöglich sogar eine ganze Weile. Die Grenzen der habitablen Zone verschieben sich mit der Zeit nach außen, weil die Sonne mit zunehmendem Alter intensiver leuchtet. Inzwischen liegt unser ungleicher Zwilling in der nach ihm benannten Venuszone. In dieser Region eines Sternensystems verursacht verdampfendes flüssiges Wasser einen »galoppierenden Treibhauseffekt«, der letztlich die Ozeane zum Kochen bringt und völlig verschwinden lässt.

Heißes Ende nach viel versprechendem Start

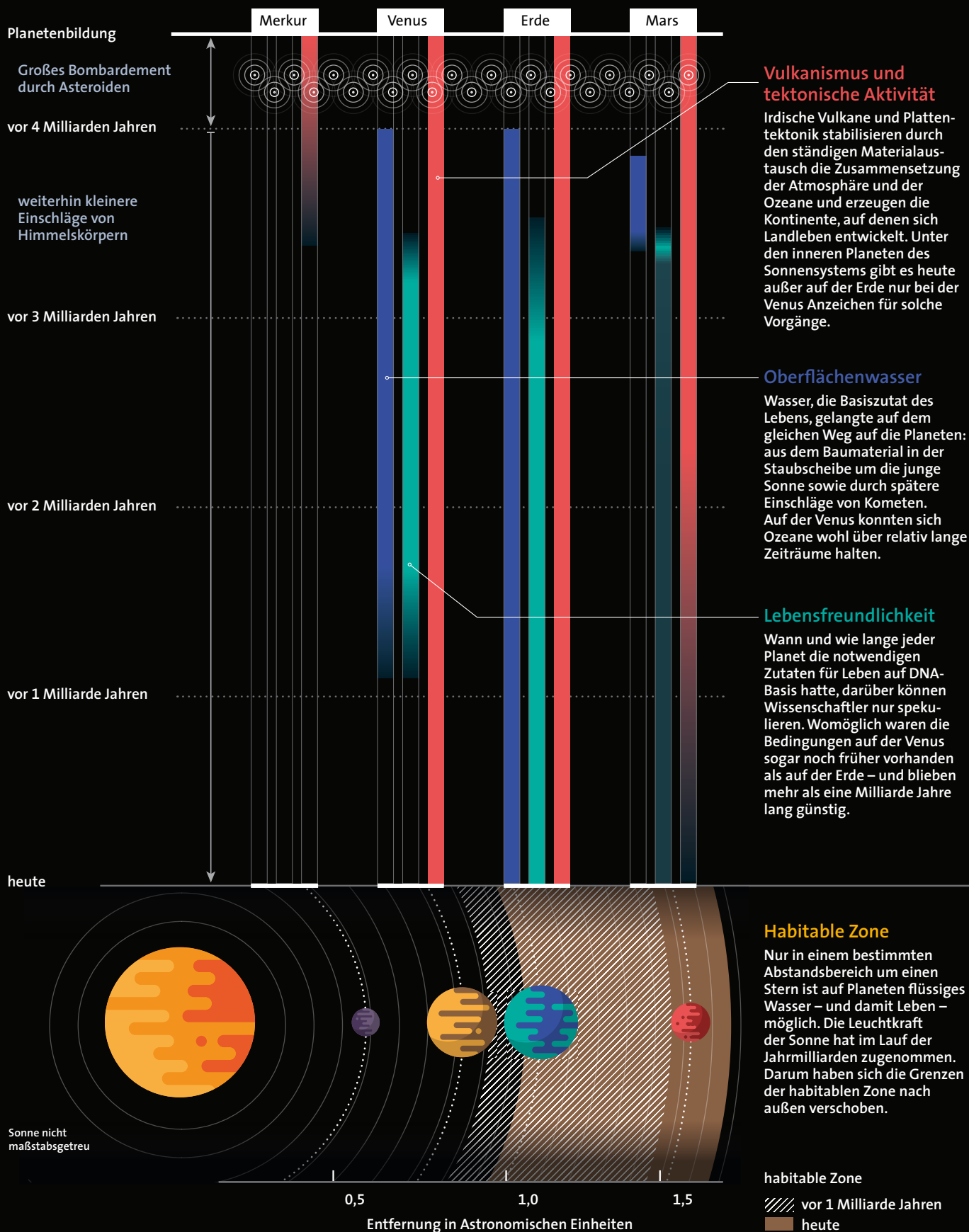
Ursprünglich entstanden Venus und Erde unter sehr ähnlichen Bedingungen. Wahrscheinlich brachten Kometen Eis auf die Oberflächen beider Planeten. Simulationen der frühen Venus zeigen, dass es hier wohl eher flüssiges Wasser gab als auf der Erde. Es könnte sich bis vor etwa einer Milliarde Jahren dort gehalten haben. Heute ist die Venus jedoch äußerst unwirtlich. Wie kam es dazu? Ist die Venus vielleicht sogar der Endzustand aller bewohnbaren Planeten dieser Größe, oder repräsentiert sie lediglich eines von vielen möglichen Schicksalen solcher Himmelskörper?

Unsere Suche nach Antworten wird zum Teil durch die dicke, nahezu undurchsichtige Atmosphäre des Planeten behindert. Hoch oben liegen Wolken aus Schwefelsäure, und am Boden ist der Luftdruck vergleichbar mit dem Wasserdruck 900 Meter unter der Oberfläche irdischer Ozeane. Die weitaus überwiegend aus Kohlendioxid bestehende Atmosphäre ist hier so dicht, dass das Gas zu einem so genannten überkritischen Fluid mit Eigenschaften sowohl eines Gases als auch einer Flüssigkeit wird.

Planetenschicksale im Vergleich

Die Frage, was Planeten lebensfreundlich macht, ist eines der größten ungelösten Rätsel der Astronomie. Erde und Venus hatten vergleichbare Startbedingungen, doch Letztere ist heute eine glühend heiße Ödnis. Forscher untersuchen, wie sich der Vul-

kanismus, die Plattentektonik und weitere Bedingungen entwickelt haben. So wollen sie herausfinden, welche Zutaten für eine Welt nötig sind, die Ökosysteme beherbergen kann.



Bot die junge Venus wirklich lebensfreundliche Bedingungen?

In dem Beitrag von Dyar, Smrekar und Kane wird die These vertreten, dass die Venus in ihrer Frühzeit von einem Ozean bedeckt gewesen sein könnte und somit lebensfreundliche Bedingungen aufgewiesen habe (siehe Infografik auf S. 43). Tatsächlich leuchtete die junge Sonne in ihrer Jugend vor mehr als vier Milliarden Jahren deutlich weniger intensiv als heute. Deshalb traf auf die Venusoberfläche eine geringere Einstrahlung. Dennoch ist es sehr wahrscheinlich, dass unser innerer Nachbarplanet niemals kühl genug war, um auf seiner Oberfläche flüssiges Wasser zuzulassen.

Die Untersuchung der geologischen Erdgeschichte lässt nämlich erkennen, dass zwei Dinge dagegen sprechen: zum einen die heutige sehr dichte Atmosphäre und zum anderen das Fehlen ausgedehnter Ablagerungen von Karbonatgesteinen auf der Oberfläche, also Kalkstein. Auf der Erde ist der allergrößte Teil des Vorrats an Kohlendioxid in den Karbonaten gespeichert, und nur ein verschwindend geringer Anteil befindet sich als freies Gas in der Atmosphäre oder in der Erdkruste. Deutlich mehr ist bis auf den heutigen Tag in den Mineralen des Erdmantels enthalten und wird durch vulkanische Aktivitäten an die Oberfläche gebracht.

Das Ausfällen von Kalkstein begann auf der Erde, als unser Planet so weit abgekühlt war, dass der in der Uratmosphäre gespeicherte Wasserdampf zu kondensieren begann und viele Millionen Jahre lang ununterbrochen als Regen auf die Oberfläche fiel. Er sammelte sich dort in Senken und bildete schließlich die ersten Ozeane. Im flüssigen Wasser befanden sich auch aus den Mineralen der Oberflächen-gesteinen gelöste Substanzen wie Kalzium- und Natriumionen. Die frühe Erdkruste bestand zum überwiegenden Teil aus vulkanischem Basalt, einem Silikatgestein, das aus Mineralen der Feldspat- und Pyroxen-Gruppen aufgebaut ist.

Gleichartige Uratmosphären

Zu dieser Zeit setzte sich die Erdatmosphäre wie die heutigen Lufthüllen von Venus und Mars zum größten Teil aus einer Mischung von Kohlendioxid und Stickstoff zusammen – riesige Mengen an Wasserdampf kamen noch hinzu. Auch das Kohlendioxid löste sich im Ozeanwasser, und bildete dort Kohlensäure, so dass die Urozeane regelrecht sprudelnden Mineralwassermeeren gleichkamen. Sie waren chemisch stark übersättigt, so dass Kalkstein, also Kalziumkarbonat (CaCO_3), abiotisch ausgefällt wurde, wie es sich auch heute noch an den irdischen Küsten beobachten lässt. Später, etwa 500 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde, sorgten irdische Lebensformen für weitere effiziente Kalkabscheidung zum Beispiel durch Schalenbildung, die der Erdatmosphäre ebenfalls einen großen Teil des Kohlendioxids entzog.

Nach und nach, also über viele Millionen Jahre hinweg, wurde so das Kohlendioxid der Erdatmosphäre in den Karbonaten fest gebunden und befindet sich auch heute noch dort. Würde alles darin gebundene Kohlendioxid freigesetzt, dann wäre die Erde von einer Kohlendioxid-Atmosphäre mit mehr als 100 Bar Druck umhüllt, was den heutigen 90 Bar auf der Venus sehr nahekommt. Zum Glück sind aber Kalkgesteine sehr temperaturbeständig. Tatsächlich muss Kalkstein auf Temperaturen von deutlich mehr als 900 Grad Celsius aufgeheizt werden, um sich chemisch zu zersetzen. Die entspricht etwa dem Doppelten der heutigen Oberflächentemperatur der Venus von 470 Grad Celsius. Des Weiteren hat Kalkstein eine deutlich geringere Dichte als etwa Basalt, der den größten Teil der Venuskruste ausmacht. Somit wird er bei tektonischen Prozessen nicht ins Innere des Planeten hineingezogen, sondern bleibt obenauf. Da jedoch Kalkstein auf der Venus offensichtlich fehlt und die Kohlendioxid-Atmosphäre auch heute noch eine enorme Dichte aufweist, spricht dies dagegen, dass unsere Nachbarin jemals einen Wasserozean besaß.

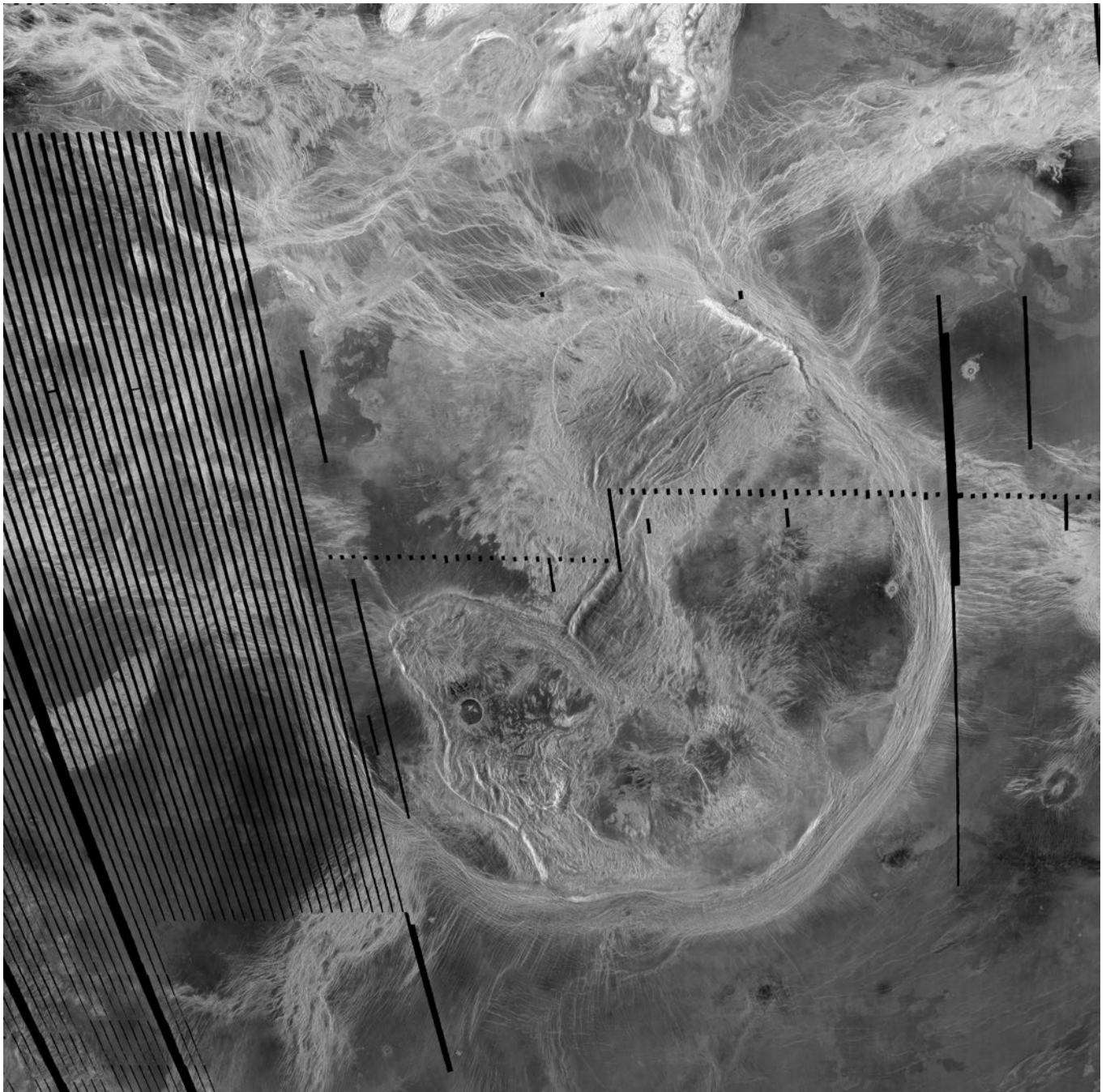
Der promovierte Geowissenschaftler und Mineraloge **TILMANN ALTHAUS** ist seit 2002 Redakteur von »Sterne und Weltraum«

Im Gegensatz zu unserer Welt hat die Venus kein Magnetfeld als Schutz vor dem Sonnenwind, da möglicherweise keine Konvektion in ihrem Eisenkern stattfindet, die Magnetfelder erzeugen könnte. Der Sonnenwind führte den aus der Spaltung von Wasserdampf durch die ultraviolette Strahlung der Sonne entstandenen Wasserstoff ab, während der Sauerstoff zurückblieb und mit den Gesteinen der Venusoberfläche reagierte. Der leichte Wasserstoff entwich schnell ins All, da die Schwerkraft der Venus wie diejenige der Erde zu gering ist, ihn auf Dauer festzuhalten. Der Sonnenwind kann aber bei der Venus wegen des fehlenden Magnetfelds viel tiefer in die Hochatmosphäre des Planeten eindringen, als das bei der Erde der Fall ist, so dass der Wasserstoff sehr effektiv abtransportiert wurde. Gleichzeitig konnte sich mangels Oberflächenwasser das ständig aus dem Planeteninneren entweichende Treibhausgas Kohlendioxid nirgends lösen. Es sammelte sich darum in der Atmosphäre an. Heute sind die Temperaturen auf Grund des Treibhauseffekts durch das CO_2 auf der Venus mehr als 400 Grad Celsius höher als auf der Erde.

Die einzigen Daten, die wir direkt von der Oberfläche der Venus haben, stammen von sowjetischen Venera-Landesonden aus den 1970er und 1980er Jahren. Diese überlebten unter den extremen Bedingungen nur wenige Minuten bis maximal zwei Stunden, aber in der kurzen Zeit übertrugen sie immerhin einige Informationen über die chemische Zusammensetzung ihrer Umgebung. Darüber hinaus beruht unser mineralogisches Wissen vor allem auf umstrittenen Interpretationen von Radarmessungen aus dem Orbit und auf Spekulationen über chemische Reaktionen zwischen den Gesteinen und den Gasen des Planeten bei den dort herrschenden Drücken und Temperaturen.

Fenster im Infraroten

Inzwischen fanden Forscher jedoch heraus: Es ist möglich, die Gesteine auf der Venus von der Umlaufbahn aus zu kartieren. Dazu muss man gewissermaßen durch geeignete Fenster im infraroten Spektralbereich schauen, bei denen Strahlung nicht vom Kohlendioxid in der Atmosphäre absorbiert wird. Glücklicherweise lassen sie gerade in Bereiche blicken, wo sich die für Vulkangestein typischen Minerale Olivin und Pyroxen bemerkbar ma-



NASA / JPL

chen. Vielleicht könnten wir so endlich die Zusammensetzung des Planeten genauer bestimmen.

Die europäische Raumsonde Venus Express, die von 2006 bis 2014 den Planeten untersucht hat, nutzte eines der Fenster. Damit erstellten Forscher für einen Großteil der Südhalbkugel die erste Übersicht der von der Oberfläche ausgestrahlten Wärme. Die Daten enthalten auch spektrale Informationen, das heißt charakteristische Ausschläge in den Intensitätskurven, mit denen sich Minerale im Boden identifizieren lassen.

Auf der Karte fallen zudem zahlreiche Hotspots auf (siehe SuW 5/2014, S.18). Solche Gebiete geben so viel Wärme ab, dass die wahrscheinlichste Erklärung dafür ein

junger Vulkanismus ist. Die Venus ist also wohl noch geologisch aktiv, im Gegensatz etwa zum Mond, der in dieser Hinsicht seit langer Zeit ruhig ist, und zum Mars, wo Vulkanismus bestenfalls vereinzelt vorkommt. Vielleicht zeigt Venus gerade, wie die Plattentektonik ihren Anfang nimmt

Auf der Erde hängt der Vulkanismus mit der Plattentektonik zusammen, also der Bewegung von Teilen der Kruste gegeneinander. Sie ist für die vielen geologischen Formationen auf unserem Planeten verantwortlich und hat außerdem langfristige Klimazyklen stabilisiert. Das hat höher entwickeltes Leben auf der Erde begünstigt oder gar erst ermöglicht. Tektonische Vorgänge bilden neue Kruste an den mittelozeanischen Rücken der Erde und

Die Struktur Artemis Corona auf der Südhalbkugel der Venus hat einen Durchmesser von rund 2100 Kilometern und wurde mit dem Radarsystem der Raumsonde Magellan kartiert. Artemis Corona ist kreisförmig vom Artemis Chasma umgeben, einem mehreren Kilometer tiefen Grabenbruch. Er wird von manchen Forschern als ein Hinweis auf eine beginnende Plattentektonik wie auf der Erde angesehen, welche dort für die Drift der Kontinentalplatten verantwortlich ist. Die feinen gekrümmten Linien auf dem Bild sind Verwerfungen in der Venuskruste, die schwarzen Bereiche Lücken in der Radarerfassung.

schieben an anderen Stellen Teile zurück in den Mantel. Beide Prozesse erlauben es unserem Planeten, Wärme und chemische Verbindungen zwischen seinen inneren und äußeren Bereichen auszutauschen. Vulkanismus bringt Wasser an die Oberfläche, hält die Atmosphäre in einem gewissen Gleichgewicht und schafft Lebensraum oberhalb des Meeresspiegels. Aus diesen und weiteren Gründen ist die Frage, ob die Venus solche Phänomene aufweist – und warum oder warum nicht – für viele Forscher so wichtig.

Spärlichen Daten zufolge begann die Plattentektonik auf der Erde vielleicht schon vor vier Milliarden Jahren. Nur wenige Spuren haben sich bis heute erhalten. Jedenfalls wissen wir nicht wirklich, wie ein mit Basalt und möglicherweise bereits mit Ozeanen bedeckter Planet zu einem komplizierten System beweglicher Platten übergeht.

Eine Hypothese lautet: Heißes Material aus dem Inneren dringt nach oben, was die Kruste und den äußeren Mantel (zusammen Lithosphäre genannt) schwächt.

Lässt sich auf der Venus der Beginn einer globalen Plattentektonik beobachten?

Die Oberfläche bricht auf, und die unter Druck stehende Gesteinsschmelze kann zu heftigem Vulkanismus führen, wie er sowohl auf der Erde als auch auf der Venus vorkommt. Die Last des ausgetretenen Materials auf der gerissenen Lithosphäre kann die betroffenen Teile absinken lassen und eine Subduktion herbeiführen, wobei eine Schicht unter eine andere gleitet. Wenn der Prozess oft genug stattfindet, stößt das die Plattentektonik an.

Eventuell geschieht das gerade auf der heutigen Venus. Die Lithosphäre auf der Venus ist heiß und dünn – wohl wie seinerzeit bei der Erde. Gewisse Regionen erinnern frappierend an terrestrische Subduktionszonen. Ein Beispiel ist Artemis Corona, eine kreisartige Formation in der Nähe des Venusäquators (siehe Bild S. 45). Ihre Größe entspricht etwa der des Aleutengraben, einer Vertiefung des Meeresbodens vor der Küste Alaskas. Solche Merkmale könnten Stellen auf der Venus kennzeichnen, an denen Material aus dem Mantel an die Oberfläche steigt und auf die Kruste drückt. Auch Laborexperimente und Computersimulationen deuten darauf hin, dass es sich hier um Subduktionszonen handelt.

Die bislang vorliegenden Bilder haben eine zu geringe räumliche Auflösung, um das sicher zu beurteilen. Aber anscheinend befindet sich die Tektonik auf der Venus im Anfangsstadium ihrer Entwicklung. Die Magellan-Bilder zeigen keine Hinweise auf miteinander verbundene Platten – vielmehr sehen wir vereinzelte Stellen, an denen die Subduktion beginnt, jeweils um solche kreisförmigen Regionen mit aufsteigendem Material. Doch warum kam es nicht früher dazu, und wie wird es weitergehen?

Sofern sich die Venus im Lauf der Zeit abkühlt, können die jetzt entstehenden Verwerfungen überdauern, und der Planet durchliefe vielleicht den gleichen Übergang zur Plattentektonik wie damals die Erde. Möglicherweise sind dieser Prozess und die damit verbundene Stabilisierung der Atmosphäre nicht nur in unserem Sonnensystem üblich, sondern auch bei Exoplaneten. Es gibt also gewichtige Gründe für weitere Missionen zum Nachbarplaneten. Mit genaueren Bildern und Spektren könnten

Wissenschaftler zentrale Fragen zum Vulkanismus und zur Plattentektonik der Venus beantworten.

Die NASA entscheidet im Rahmen ihres Discovery-Programms regelmäßig über kleine, verhältnismäßige kostengünstige Missionen. Zwei von uns (Smrekar und Dyar) sind an der Planung einer vorgeschlagenen Raumsonde namens VERITAS beteiligt, der »Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy«. Sie würde die Oberfläche viel detaillierter erfassen und hätte neben einer Kamera auch ein Spektrometer an Bord. Weitere Arbeitsgruppen erstellen ebenfalls Konzepte. So könnte eine neue Generation von Planetologen die Chance bekommen, besser zu verstehen, warum unsere Nachbarin einen so anderen Weg gegangen ist als die Erde, und mehr über die Entwicklungen in Erfahrung zu bringen, die solche Himmelskörper lebensfreundlich machen.

Leider ist bislang keine Venusmission über den Status einer Studie hinausgekommen, und es gibt derzeit keine konkreten Projekte für Venussonden bei den weltweiten Raumfahrtorganisationen. ☺



Lisa Quinones

M. DARBY DYAR ist Mineralogin am Mount Holyoke College in South Hadley, Massachusetts und am Planetary Science Institute in Tucson, Arizona. Sie untersucht die Himmelskörper des Sonnensystems spektroskopisch.



SUZANNE E. SMREKAR ist Astronomin und hat sich auf die Entwicklung von Felsplaneten spezialisiert. Sie ist stellvertretende Chefwissenschaftlerin der NASA-Marsmission InSight.



STEPHEN R. KANE ist Astrophysiker am Department of Earth Sciences der University of California, Riverside und war an der Entdeckung Hunderter von Exoplaneten beteiligt.

Dieser Artikel wurde ursprünglich unter dem Titel »The Exoplanet Next Door« in *Scientific American* 320, 2, 56–63 (Februar 2019) veröffentlicht.
doi:10.1038/scientificamerican0219-56

Literaturhinweise

Althaus, T.: Venus – Die eigenwillige Schwester der Erde. *Sterne und Weltraum* 8/2007, S. 32–39

Davaille, A.: Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus. *Nature Geoscience* 10, 2017

Way, M.J. et al.: Was Venus the first habitable world of our Solar System? *Geophysical Research Letters* 43, 2016

Dieser Artikel und Weblinks im Internet:
www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1692314

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1421007

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ! Ausgewählte **Spektrum KOMPAKT** gibt es auch im Printformat!

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt