

## PLANETEN

# Die Geschwister der Erde

Die Erforschung mit Raumsonden führt zu einem neuen Bild unseres Sonnensystems.

Ulrich Christensen und Norbert Krupp

Die Erde lässt sich besser verstehen, wenn wir ihre nahen Verwandten genauer kennen. Daher haben viele Raumsonden die Planeten und Monde unseres Sonnensystems unter die Lupe genommen und dabei u. a. Vulkanismus gefunden, der Auskunft über das Innere eines Himmelskörpers gibt. Einige Planeten besitzen ein Magnetfeld, das sich in den planetaren Raum ausbreitet und wie ein Schutzschild wirkt. Spannend bleibt die Suche nach Wasser auf anderen Planeten und Monden. Kann es dort Leben geben?

**M**it Beginn des Raumfahrtzeitalters vor 50 Jahren hat unsere Kenntnis über die Planeten des Sonnensystems größere Sprünge gemacht als durch die Einführung des Teleskops vor 400 Jahren. Inzwischen haben zahlreiche Sonden die Planeten umflogen, diese zum Teil aus einer Umlaufbahn eingehend studiert oder sie sind wie bei Mars, Venus, dem Erdmond und dem Saturnmond Titan sogar weich gelandet. Ist alles Wichtige nun bekannt, und geht es bei weiteren Raummissionen nur noch darum, weiße Flecken auf der Landkarte zu füllen? Keinesfalls, denn die Kette von teilweise völlig unerwarteten Entdeckungen ist in den letzten zehn Jahren nicht abgerissen.

Die Planetenforschung liegt in den Händen von Wissenschaftlern, die sich primär mit der Erde befassen, wie z. B. Geologen und Mineralogen, Geophysiker, Plasmaphysiker, Meteorologen und sogar Geobiologen. Das wichtigste Ziel dabei ist es zu ergründen, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Erde und ihren planetaren Geschwistern bestehen und insbesondere wie und weshalb sich ihre Entwicklungswege unterscheiden. Wir wollen verstehen, was die Erde besonders macht, warum sich auf ihr lebensfreundliche Bedingungen eingestellt haben und ob es solche Bedingungen auch auf anderen Planeten gegeben hat oder sogar noch gibt.

Für die Denker der Antike bestand die irdische Materie aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde, während die Himmelskörper aus etwas Reinem, dem Äther, aufgebaut waren. Mit dem Teleskop entdeckten Astronomen, dass auch andere feste Himmelskörper meist aus profanem Gestein („Erde“) bestehen und erkannten schließlich, dass auch die übrigen „Elemente“ bei allen Planeten eine wichtige Rolle spielen. Vulkanismus („Feuer“) ist Ausdruck dafür, dass das Innere eines Planeten nicht kalt und starr ist, sondern



dass unter der Oberfläche konvektive Strömungsprozesse ablaufen. Die Vulkaneruptionen erneuern die Oberfläche des Planeten und sind eine Quelle für atmosphärische Gase und Wasser an der Oberfläche. Eine Atmosphäre („Luft“) dämpft die sonst extremen Temperaturschwankungen an der Oberfläche und ist Voraussetzung dafür, dass dort Flüssigkeiten existieren können. Wasser, vor allem in flüssiger Form, ist nach unserem heutigen Verständnis unabdingbar für die Entwicklung und die Existenz von Leben. In diesem Artikel wollen wir ein besonderes Augenmerk auf das Vorkommen dieser „Elemente“ und der mit ihnen verbundenen dynamischen Rolle auf anderen Planeten unseres Sonnensystems richten.

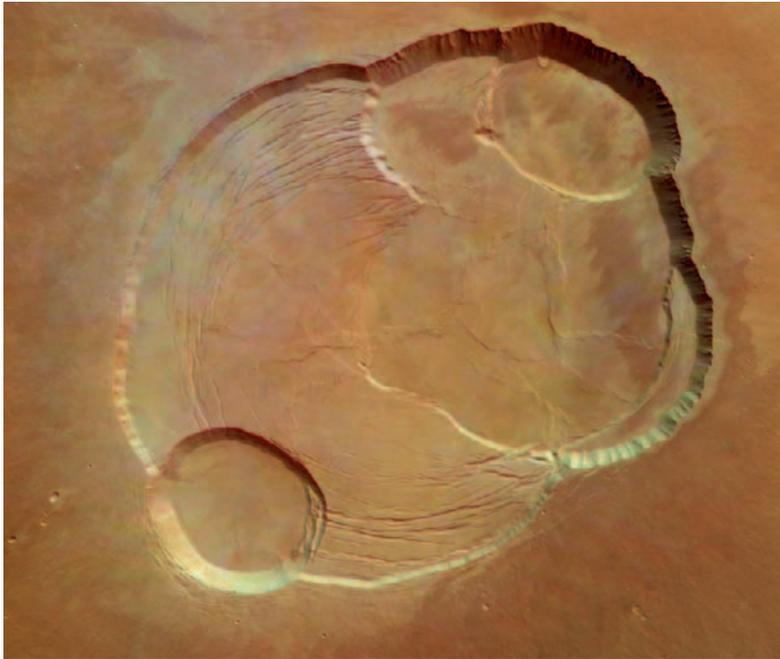
Mit der neuen Definition des Begriffs „Planet“ wurde Pluto zu einem Zwergplaneten degradiert (vgl. die Einleitung von M. Bartelmann). Für Planetologen ist

Verbirgt sich Leben auf einem der anderen Planeten oder Monde im Sonnensystem?

## KOMPAKT

- Aktiven Vulkanismus gibt es u. a. auf der Erde, der Venus und dem Jupitermond Io. Er ist ein Zeichen für konvektive Strömung im Inneren des Himmelskörpers und wird durch Plattentektonik oder Mantelplumes ausgelöst.
- Kryovulkane, die z. B. auf dem Saturnmond Titan vorkommen, speien statt Lava Substanzen wie Methan, Kohlendioxid, Wasser oder Ammoniak.
- Mehrere Planeten besitzen ein eigenes Magnetfeld, das meist durch einen Dynamoprozess entsteht. Auf dem Mars gibt es nur noch starke lokale Magnetfelder, die auf eine remanente Magnetisierung zurückgehen.

Prof. Dr. Ulrich Christensen und Dr. Norbert Krupp, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS), Max-Planck-Straße 2, 37191 Katlenburg-Lindau



**Abb. 1** Der Schildvulkan Olympus Mons (aufgenommen von der Raumsonde Mars Express) ist mit 24 Kilometern Höhe die größte Erhebung in unserem Sonnensystem.

die Unterscheidung ziemlich irrelevant. Sie bezeichnen jeden genügend großen Körper, der annähernd Kugelgestalt hat, als Planeten – selbst wenn er als Satellit einen anderen Planeten umkreist. Die Kugelgestalt impliziert stets, dass das Innere des Himmelskörpers in seine verschiedenen Komponenten (z. B. Metall, Gestein oder Eis) differenziert ist und dass der Körper zumindest in seiner Frühzeit im Inneren aktiv war und seine Oberfläche umgestaltet hat.

## Wenn Planeten Feuer spucken

Aktiver Vulkanismus ist der augenfälligste Beleg dafür, dass das Innere eines Planeten dynamisch aktiv ist. Direkt beobachtet wurde vulkanische Aktivität außer bei der Erde bisher beim Jupitermond Io, dessen Inneres durch die Gezeitenreibung des nahen Jupiters aufgeheizt wird, und – völlig unerwartet – beim kleinen, eisigen Saturnmond Enceladus. Auf dem Mars sehen wir riesige Schildvulkane (Abb. 1).

Auf der Erde entsteht der Vulkanismus auf drei verschiedene Arten. Zwei davon hängen mit der Plattentektonik zusammen, die es auf dem Mars nicht (mehr) gibt und die daher als Ursache ausscheiden. Dort kommen nur sog. Mantelplumes infrage – säulenförmige Ströme von heißem Silikatgestein, die von der Grenze zwischen Gesteinsmantel und Eisenkern aufsteigen. Wenn das heiße Gestein flache Tiefen erreicht, in denen Druck und Schmelztemperatur geringer sind, schmilzt es zu 5 bis 30 % auf. Das entstehende basaltische Magma bahnt sich einen Weg an die Oberfläche. Auf der Erde gibt es mindestens 30 solcher auf Mantelplumes beruhende Vulkanregionen, z. B. auf Hawaii. Auf dem Mars finden sich die meisten großen Vulkane in einer begrenzten Region, der Tharsis-Aufwölbung. Möglicherweise gibt es aufgrund der Struktur des Marsmantels dort nur ein oder zwei Plumes. Wegen der geringeren Schwerkraft auf dem Mars treten

druckinduzierte Phasenumwandlungen der Silikatmineralien, die bei der Erde im oberen Drittel des Mantels liegen, erst knapp oberhalb der Grenze zum Eisenkern auf, also in der mutmaßlichen Quellenregion von Plumes. Diese Phasenumwandlungen behindern die Konvektionsbewegungen des Mantels, und Computersimulationen legen nahe, dass sie im Mars dazu führen können, dass sich die heißen Aufströmungen in nur ein bis zwei großen Plumes konzentrieren [1]. Die Tharsis-Vulkane sind bereits Milliarden von Jahren alt – ist der Vulkanismus auf dem Mars heute erloschen?

Kraterstatistiken dienen dazu, das Alter einer Planetenoberfläche zu bestimmen, von der es keine direkten Proben gibt. Mithilfe der Mondoberfläche, deren Alter dank der Apollo-Proben bekannt ist, lässt sich diese Methode kalibrieren. Krater entstehen durch kleine und mittelgroße Körper, die regellos und über längere Zeit in einem gleichmäßigen Strom die Oberfläche bombardieren. Eine Region, die mit vielen Kratern übersät ist, ist demnach älter als eine mit wenigen. Kleine und sehr junge Oberflächenregionen sind jedoch schwierig zu datieren, da sie nur wenige Krater aufweisen. Wichtig ist es daher, auch sehr kleine Krater zu erkennen, die naturgemäß viel häufiger vorkommen als große Vertiefungen. Dabei spielt die Auflösung der verwendeten Kamera eine entscheidende Rolle.

Mit den Bildern einer hoch auflösenden Kamera an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express (mit 2,5 – 10 m pro Pixel) ließ sich das Alter der großen Caldera-Region des Olympus Mons zu 100 bis 200 Millionen Jahre ermitteln – relativ wenig verglichen mit dem Planetenalter von 4,5 Milliarden Jahren. Einige Flankenregionen von Olympus Mons sind sogar nur 2,5 Millionen Jahre alt [2]. Das lässt die Mutmaßung zu, dass der Vulkanismus auf dem Mars nicht endgültig erloschen ist, selbst wenn die vulkanische Aktivität in der jüngeren geologischen Vergangenheit episodisch und von langen Ruhephasen unterbrochen sein könnte.

Auch auf unserem Schwesterplaneten Venus, deren Oberfläche unter einer geschlossenen Wolkendecke verborgen liegt, hat die amerikanische Magellan-Sonde durch Radarkartierung zahlreiche Vulkanstrukturen auf der Oberfläche entdeckt. Da die Venus fast so groß ist wie die Erde und daher im Inneren vermutlich noch aktiver als der deutlich kleinere Mars ist, bestehen hier größere Hoffnungen, einen Vulkanausbruch in flagranti beobachten zu können. Im nahen Infrarot ist die Venusatmosphäre durchscheinend, sodass sich ein ausgedehnter heißer Lavastrom oder Magmasee als zeitlich variabler heller Punkt in den Infrarotinstrumenten auf der europäischen Mission Venus Express bemerkbar machen, die seit 2006 unseren Nachbarplaneten umkreist. Bisher wurde nichts gefunden, aber kleinere Ausbrüche würden wegen der starken Streuung des Signals in der Atmosphäre verborgen bleiben.

Bei der Erde trägt der Vulkanismus große Mengen von Gasen wie Schwefeldioxid in die Atmosphäre ein. In der Venusatmosphäre sind recht hohe und vor allem im Laufe von Monaten und Jahren stark schwankende Konzentrationen von  $\text{SO}_2$  zu beobachten. Schwefel-

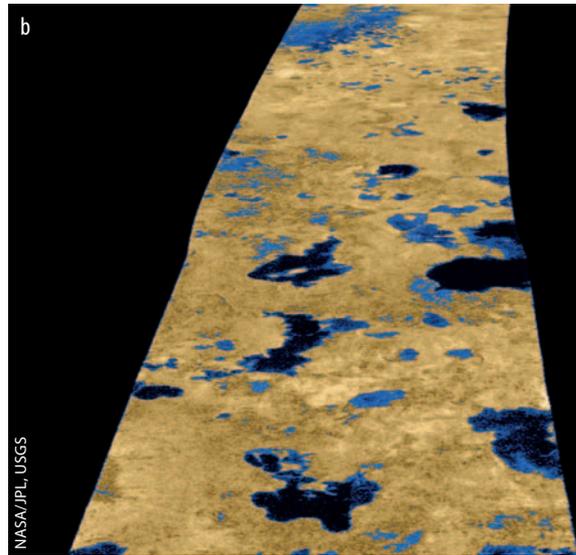
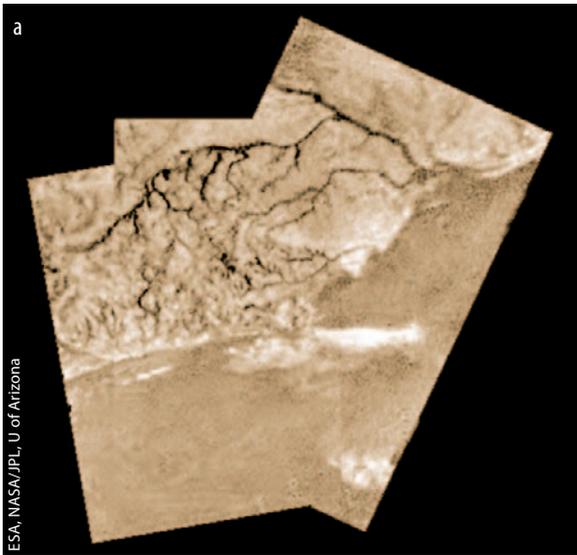


Abb. 2 Auf dem Saturnmond Titan finden sich Flussläufe, die mit flüssigem Methan gefüllt sind (a). Die Cassini-Radaraufnahmen zeigen ganze Methan-Seen auf der Nordhalbkugel (b).

dioxid sollte aber nicht lange in der Atmosphäre verbleiben, da es durch photochemische Umwandlung in Schwefelsäure (aus der die Wolken der Venusatmosphäre bestehen) und durch chemische Reaktion mit den Oberflächengesteinen wieder abgebaut wird. Die hohen Konzentrationen und starken Schwankungen könnten somit darauf hindeuten, dass aktive vulkanische Prozesse  $\text{SO}_2$  episodisch in die Atmosphäre eintragen.

Auf der Erde entstehen durch den Vulkanismus magmatische Krustengesteine. Zudem sind große Teile des Ozeanwassers und der Atmosphäre dabei an die Oberfläche gekommen (zum Teil können sie auch von Kometen herrühren, die mit der Erde kollidiert sind). Auf den eisigen Monden des äußeren Sonnensystems spielt sich Ähnliches mit veränderten Rollen ab. Der Saturnmond Titan ist von einer dichten Atmosphäre und einer kaum durchsichtigen Smoggschicht umgeben. Auf Radarbildern der Raumsonde Cassini sind Strukturen zu erkennen, die Schildvulkanen ähneln, bei denen es sich aber um sog. Kryovulkanismus handelt: Kryovulkane speien keine glutflüssige Lava, sondern leicht schmelzbare Substanzen wie Methan, Kohlendioxid, Wasser oder Ammoniak, die im Inneren des Planeten oder Mondes in gefrorenem Zustand vorliegen. Da dort, z. B. durch Gezeitenkräfte, Wärme entsteht, schmelzen diese Stoffe und gelangen zur Ober-

fläche, wo sie erstarren und sich zu mehreren hundert Meter hohen Ablagerungen aufschichten können.

Methan übernimmt auf Titan eine ähnliche Rolle wie Wasser auf der Erde. Sein Anteil in der Atmosphäre beträgt rund 5 %. Nahe der Oberfläche kann es kondensieren und Wolken bilden, aus denen Niederschlag fällt. Die von der Raumsonde Cassini auf Titan abgesetzte Huygens-Sonde landete im Januar 2005 in einem ausgetrockneten Methan-See. Die Bilder, die sie vorher aus einigen Kilometern Höhe aufgenommen hat, zeigen ein dendritisches Flusssystem, das diesen See einmal gespeist hat (Abb. 2). Auf späteren Radaraufnahmen bei nahen Vorbeiflügen von Cassini an Titan waren zahlreiche spiegelglatte Flächen in polaren Breiten des Mondes zu sehen, die sich kaum anders als flüssigkeitsgefüllte Senken deuten lassen – eine Seenplatte aus einer Mischung von Methan und anderen Kohlenwasserstoffen.

Aktiven Kryovulkanismus hat Cassini auf dem kleinen Saturnmond Enceladus (Durchmesser 500 km) entdeckt. Veränderungen in der Nähe des Mondes ließen darauf schließen, dass an seinem Südpol riesige Mengen von Staub und Wassereis austreten müssen [3]. Die Instrumente der Sonde zeigten einige tiefe Schluchten, aus denen bis zu 150 kg Wassereismoleküle pro Sekunde austreten [4] – eine Art Kryovulkanismus

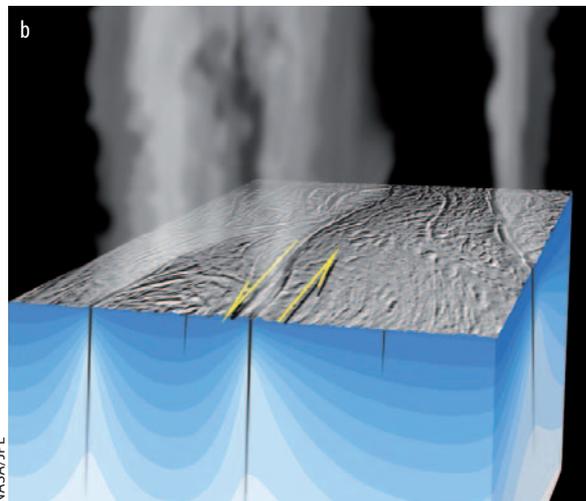
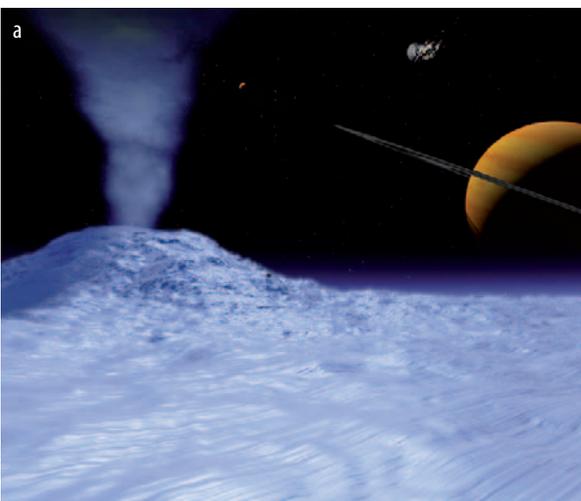


Abb. 3 Bei ihrem Vorbeiflug hat die Raumsonde Cassini auf dem Saturnmond Enceladus aktiven Kryovulkanismus entdeckt (a). Aus Schluchten steigen regelrecht Geysire auf (b).

NASA/JPL

NASA/JPL

vergleichbar mit Prozessen in Geysiren oder Schneekanonen auf der Erde (Abb. 3). Damit ließ sich die Quelle des äußersten Rings von Saturn identifizieren und eine der offenen Fragen zum Verständnis des Saturnsystems klären.

## Der Dynamo im Planeten

Neben der Erde haben mehrere andere Planeten ein eigenes Magnetfeld, das in einem Dynamoprozess entsteht. Grundvoraussetzung dafür ist eine elektrische leitende und flüssige Region im Inneren des Planeten. Bei den erdähnlichen Planeten handelt es sich um einen Eisenkern, bei Jupiter und Saturn um eine metallische Hochdruckform des Wasserstoffs und bei Uranus und Neptun um eine in der Planetologie als „Eis“ bezeichnete Mischung von Wasser, Ammoniak und Methan, die im Inneren der beiden Planeten als ein Fluid mit ionischer Leitfähigkeit vorliegt. Konvektionsströmungen in der leitenden Flüssigkeit verursachen einen Dynamoprozess, bei dem durch Induktion elektrische Ströme und damit ein Magnetfeld entstehen. Für die Erde ist dieser Prozess einigermaßen verstanden, und viele Eigenschaften des Erdmagnetfelds ließen sich in numerischen Modellen reproduzieren (Abb. 4) [5].

Betrachten wir die Gesamtheit der Planeten, so erstaunt die Vielfalt in der Stärke und Morphologie ihrer Magnetfelder:

- Jupiters Magnetfeld wird wie das der Erde durch einen leicht gegen die Rotationsachse geneigten Dipolanteil dominiert und ist an der Planetenoberfläche zehnmal stärker als das Erdmagnetfeld.
- Beim Merkur, dem kleinsten und sonnennächsten Planeten, registrierte die Sonde Mariner 10 in zwei Vorbeiflügen 1974/75 ein Feld, das an der Oberfläche hundertmal schwächer ist als das der Erde. Wegen der geringen Intensität ist zweifelhaft, ob dafür ebenfalls ein Dynamo verantwortlich ist. Im vergangenen Jahr bestätigten Messungen der Raumsonde Messenger, dass es sich um ein globales, an der Rotationsachse ausgerichtetes Dipolfeld handelt, was die Dynamo-hypothese stützt.
- Saturns Dipol scheint völlig parallel zur Rotationsachse ausgerichtet zu sein, auch in den Quadrupol- und Oktupolanteilen konnte die Raumsonde Cassini, die seit 2004 den Saturn umkreist, keine Abweichung von der Axialsymmetrie feststellen. Das gibt Rätsel auf, da ein grundlegendes Theorem besagt, dass ein homogener Dynamo kein perfekt axialsymmetrisches Magnetfeld erzeugt.

■ Uranus und Neptun besitzen Magnetfelder, deren Dipolachsen stark gegen die Rotationsachse geneigt sind und deren Quadrupol- und Oktupolanteile an der Planetenoberfläche genauso stark sind wie der Dipol. Die Satelliten der großen Planeten besitzen kein Magnetfeld, nur der größte Jupitermond Ganymed macht eine Ausnahme.

■ Auch Venus und Mars haben kein eigenes Magnetfeld. 1997 gelangte die Sonde Mars Global Surveyor so nahe an die Marsoberfläche heran wie kein Orbiter zuvor. Sie entdeckte starke lokale Magnetfelder in Gebieten, wo die Oberfläche über vier Milliarden Jahre alt ist. Sie lassen sich auf remanente Magnetisierung ferromagnetischer Mineralien in der Marskruste zurückführen. Diese kann nur in einem starken, von einem Dynamo erzeugten Magnetfeld erworben worden sein, das der Mars in seiner Frühzeit gehabt haben muss.

Aber warum kam der Dynamoprozess zum Erliegen? Die plausibelste Erklärung wäre, dass der Eisenkern des Mars zwar noch flüssig ist, aber nicht konvektiert. Thermische Konvektionsbewegungen setzen voraus, dass die Temperatur nach unten

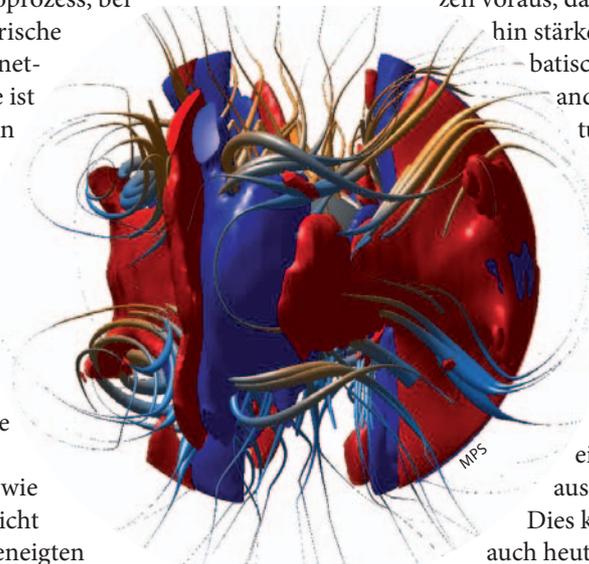
hin stärker ansteigt als mit dem adiabatischen Temperaturgradienten, andernfalls ist die Dichteschichtung stabil. Möglicherweise

ist der Wärmefluss aus dem Kern des Mars in der Frühgeschichte des Planeten unter den Wert gesunken, der sich allein durch Wärmeleitung transportieren lässt. Im Gegensatz zum Mars gibt es auf der Erde Plattentektonik, mit der eine höhere Wärmeabgabe aus dem Inneren verbunden ist.

Dies könnte der Grund für einen auch heute noch überadiabatischen Temperaturgradienten im Erdkern und die Existenz des Dynamos bei uns sein. Entscheidend

könnte aber auch der kleine feste innere Erdkern sein. Selbst wenn die Temperaturschichtung im äußeren flüssigen Kern dynamisch stabil sein sollte, können Konzentrationsunterschiede leichter Elemente eine Art chemische Konvektion antreiben. Der äußere Erdkern besteht zu etwa 10 % aus leichten Komponenten wie Silizium, Sauerstoff oder Schwefel. Im Zuge der Abkühlung der Erde kristallisiert nahezu reines Eisen-Nickel an der Grenze zum inneren Kern aus, und die leichten Komponenten reichern sich in der darüber liegenden Flüssigkeitsschicht an. Man nimmt an, dass der Mars (noch) keinen inneren Kern hat, sicher ist dies aber nicht.

Aufschluss hierüber können künftig die Daten von Seismometern liefern, welche die wichtigste Informationsquelle über den inneren Aufbau der Erde sind. Auch die genaue Größe des Marskerns ließe sich so bestimmen. Außer auf der Erde haben Seismometer bisher nur auf dem Mond Daten geliefert. Auf dem



► Abb. 4 Diese Dynamosimulation zeigt die komplexe Struktur magnetischer Feldlinien im flüssigen Eisenkern eines Planeten.

Mars soll ein erstes Instrument mit der Europäischen Exomars-Mission ab 2016 zum Einsatz kommen.

Aktuelle und künftige Raummissionen werden die Magnetfelder einiger Planeten genauer charakterisieren. In einer Verlängerungsphase soll Cassini das Saturnmagnetfeld auch in polaren Breiten unter die Lupe nehmen. Damit lassen sich vielleicht kleine Abweichungen von der Axialsymmetrie finden. Die Juno-Mission der NASA wird die räumliche Struktur des Jupiterfeldes mit einer Genauigkeit bestimmen, die fast an die heranreicht, mit der das irdische Magnetfeld bekannt ist. Die Messenger-Sonde (ab 2011) und die zwei Sonden der europäisch-japanischen Bepi Colombo Mission (ab 2019) werden aus Umlaufbahnen um den Merkur dessen Magnetfeld genau vermessen. Erste Dynamomodelle für verschiedene Planeten wurden in jüngster Zeit entwickelt [6]. Mit den erwarteten neuen Daten lassen sie sich auf den Prüfstand stellen.

## Magnetisches Schutzschild

Die Magnetfelder der Planeten breiten sich im interplanetaren Raum aus und bilden die Magnetosphäre und damit einen wirksamen Schutzschild gegenüber dem Sonnenwind. Die geladenen Teilchen im interplanetaren Raum werden wirkungsvoll um die Magnetosphäre herumgelenkt und können nicht in die Atmosphäre/Ionosphäre oder auf die Oberfläche gelangen. Nur in den Polregionen des Planeten können sie tiefer eindringen und die wunderschönen Polarlichter auslösen. Wie weit sich die Magnetosphären ausdehnen, hängt von der Stärke des internen Magnetfeldes und von eventuell vorhandenen Teilchenquellen innerhalb der Magnetosphäre ab. In den letzten 10 bis 15 Jahren hat sich das Verständnis der Prozesse in den Magnetosphären von Erde, Jupiter und Saturn dramatisch verbessert.

Vor-Ort-Messungen des Magnetfeldes, der in den Magnetosphären gebundenen geladenen Teilchen und die Messungen elektromagnetischer Wellen haben das Bild der Planetenumgebung stark verändert. Vier Satelliten des Cluster-Projekts messen die Erdmagnetosphäre seit 2000 zeitlich und räumlich aufgelöst. Zwischen 1995 und 2004 flog Galileo als erste Raumsonde in einer Umlaufbahn um Jupiter durch die größte Magnetosphäre unseres Sonnensystems. Dabei konnte sie auch das interne Magnetfeld des Mondes Ganymed und seine Magnetosphäre bestimmen, deren Größe der um Merkur ähnelt. Sie ist in die Magnetosphäre des Jupiter eingebettet und bildet somit einen Sonderfall.

Die Raumsonde Cassini umrundet seit 2004 den Ringplaneten Saturn. Ein wissenschaftliches Ziel dieser Mission ist es, die Saturnmagnetosphäre zu erforschen, die in ihrer Struktur und mit den in ihr ablaufenden physikalischen Prozessen mit der Erde sowie mit Jupiter vergleichbar ist. Neue Ergebnisse von Cassini zeigen, dass in der Magnetosphäre die Zählraten von geladenen und neutralen Teilchen, das Magnetfeld und die Plasmawellendaten periodisch schwanken. Die Periode



Abb. 5 Die Ringe um den Saturnmond Rhea (hier als artist view gezeigt) wurden durch Absorptionssignaturen in den Zählraten von energiereichen Elektronen entdeckt, die an Bord der Raumsonde Cassini gemessen wurden.

dieser Schwankungen entspricht der Rotationsdauer des Planeten und hat vermutlich etwas mit seiner Lage im Sonnensystem zu tun, denn die Rotationsachse und die magnetische Achse sind nahezu parallel zueinander.

Die Galileo-Sonde erforschte Transportphänomene in der Jupitermagnetosphäre und die Wechselwirkung zwischen dem magnetosphärischen Plasma und den Monden im Jupitersystem. Magnetosphärisches Plasma und energiereiche geladene Teilchen bewegen sich entlang und senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Kreuzen sich die Bahnen dieser Teilchen irgendwo in der Magnetosphäre mit einem Körper (z. B. ein Mond, Ringe, Gaswolke etc.), so gehen einige oder alle Teilchen verloren. Dadurch entsteht eine Lücke in ihrer Verteilung. Die Auswertung solcher sog. Absorptionssignaturen ermöglichte es u. a., das Ringsystem um den Saturnmond Rhea zu entdecken (Abb. 5) [7] und erlaubte den Schluss, dass der Jupitermond Europa einen Wasserstofftorus entlang seiner Bahn um Jupiter ausbildet.

Transportphänomene und Austausch von Materie zwischen verschiedenen Regionen in einer Magnetosphäre sind wichtig, um die physikalischen Prozesse in Magnetosphären zu verstehen – z. B. die „Injektion“ energiereicher (heißer) Teilchen aus den äußeren Regionen in die innere Magnetosphäre mit energieärmerer (kalter) Population. Im Austausch dazu gelangt Materie über andere Prozesse wieder nach außen. Die Analyse von Teilchenverteilungen in der Jupiter- und Saturnmagnetosphäre aus Daten der Raumsonden Galileo und Cassini hat wesentlich zum Verständnis der ablaufenden Prozesse beigetragen.

## Wasser zum Leben

Leben in der Form, wie wir es kennen, ist ohne Wasser undenkbar. Deshalb ist die Suche nach Wasser außerhalb der Erde so wichtig. In den letzten Jahren ließen sich durch Raumsonden und stark verbesserte bodengebundene Beobachtungen einige Kandidaten identifi-



M. Di Lorenzo, K. Kremer, NASA/JPL/UA/MPS/Spaceflight

Abb. 6 Mit dem Greifarm grub die Phoenix-Sonde am Fuß ihres Landegestells einen hellen glatten Block aus, den die Wissenschaftler für Eis halten.

zieren, die heute oder zu früheren Zeiten nachweislich über Wasser verfügen bzw. verfügt haben. Radarmessungen von Mars Express zeigen in den Polregionen unter einer Staubschicht Eismassen, die in flüssiger Form den gesamten Planeten mit einem mehrere zehn Meter tiefen Ozean bedecken könnten. Die im Norden des Planeten gelandete Sonde Phoenix stieß im letzten Jahr mit einem Baggerarm unter einer sehr dünnen Schicht aus rotem Marsstaub auf Eisbrocken (Abb. 6). Frühere Missionen haben in der Nähe des Marsäquators ausgetrocknete Flusstäler untersucht, in denen vor vielen Millionen Jahren Wasser geflossen sein muss.

Auch die Jupitermonde Europa, Ganymed und Callisto beherbergen vermutlich riesige unterirdische Ozeane aus Wasser, die durch die Wärme aufgrund der starken Gezeitenkräfte zwischen den Monden und Jupiter und durch radioaktive Prozesse im Innern dieser Körper flüssig bleiben. Ob sich primitive Lebensformen in den Ozeanen bilden konnten, ist bislang unklar. Enceladus mit seinen Geysiren ist ein weiterer Kandidat. Vermutlich sind Wasserreservoirs im Inneren des Mondes für die Fontänen über dem Südpol verantwortlich.

Auch kleinere Körper wie Kometen, transneptunische Objekte oder Asteroiden aus den äußeren Bereichen des Asteroidengürtels beherbergen Wasser und Eis. Möglicherweise haben diese Objekte in der frühen Phase unseres Sonnensystems Wasser auf die Erde und andere Planeten gebracht. Messungen des Mengenverhältnisses von Wasserstoff und seinem Isotop Deuterium deuten eher auf Asteroiden hin, da in Wassereinschlüssen in kohligen Chondriten (primitiven Meteoriten aus dem Asteroidengürtel) ähnliche Verhältnisse gefunden wurden wie in ozeanischem Wasser. Bisherige Messungen dieses Isotopenverhältnisses an Kometen und transneptunischen Objekten stimmten dagegen schlecht mit irdischem Wasser überein. Unklar ist jedoch, ob die untersuchten Kometen repräsentativ für Kometen aus dem Kuiper-Gürtel sind. Zudem ist inzwischen eine neue Klasse von Kometen im Hauptasteroidengürtel entdeckt worden, die als Quelle für das irdische Wasser infrage kommen [8].

Für Leben sind auch organische Moleküle erforderlich, die man in Kometenschweifen und in der

Atmosphäre des Saturnmondes Titan in großer Anzahl gefunden hat. Mars und die Monde Europa, Enceladus und Titan sind die Körper in unserem Sonnensystem, die in dieser Hinsicht am interessantesten erscheinen. Allerdings beeinträchtigen Umgebungsparameter, wie z. B. die lebensfeindliche hochenergetische Strahlung die Entstehung von Leben im Weltraum wesentlich. Der Mond Europa liegt zwar in der Magnetosphäre von Jupiter und wird damit von der kosmischen Strahlung und dem Sonnenwind abgeschirmt, aber er umkreist den Planeten in einem Abstand, in dem Elektronen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit auf seine Oberfläche treffen und Leben dort unmöglich machen. Selbst gut abgeschirmte elektronische Bauteile von Raumsonden überleben nur wenige Wochen in diesem Teil der Jupitermagnetosphäre – dem stärksten Strahlungsgürtel des Sonnensystems. Mögliches Leben könnte sich hier nur in der Tiefe verbergen.

Weitere Raumsonden werden zu Planeten in unserem Sonnensystem starten und neue Welten entdecken.<sup>1)</sup> Dabei bilden Mars und der Erdmond den Schwerpunkt, doch auch Zwergplaneten wie Vesta und Ceres im Asteroidengürtel sind Ziel von Missionen (Dawn-Mission). Die Rosetta-Mission der ESA wird nicht nur erstmals einen Kometenkern umkreisen und aus wenigen Kilometern Höhe über viele Monate untersuchen, sondern auch die Landesonde Philae an seiner Oberfläche absetzen.

#### Literatur

- [1] H. Harder und U. Christensen, *Nature* **380**, 507 (1996)
- [2] G. Neukum et al., *Nature* **432**, 971 (2004)
- [3] M. K. Dougherty et al., *Science* **311**, 5766 (2006)
- [4] J. H. Waite et al., *Science* **311**, 5766 (2006)
- [5] U. Christensen und A. Tilgner, *Physik Journal*, Oktober 2002, S. 41
- [6] S. Stanley und J. Bloxham, *Nature* **428**, 151 (2004);  
U. Christensen und Wicht, *Icarus* **196**, 16 (2008)
- [7] G. N. Jones et al., *Science* **319**, 1380 (2008)
- [8] H. Hsieh et al., *Science* **312**, 561 (2006)

#### DIE AUTOREN

**Ulrich Christensen** ist durch die Erkenntnis, dass wir die Erde besser verstehen, wenn wir uns mit ihren nahen Verwandten befassen, zur Planetenforschung gekommen. Nach Promotion an der TU Braunschweig und Stationen in Mainz und Göttingen ist er seit 2002 Direktor am MPI für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau. Er beschäftigt sich mit der Konvektionsströmung und Magnetfelderzeugung im Inneren von Planeten. In der Freizeit versucht er, die Strömungsmechanik auf Segelyachten praktisch anzuwenden.



**Norbert Krupp** beschäftigt sich mit den Planeten Jupiter und Saturn und ihren Monden. Nach dem Physikstudium an der Uni Kaiserslautern, der Promotion an der TU Braunschweig und einem Auslandsaufenthalt an der Johns Hopkins University, USA, arbeitet er seit 1996 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für Sonnensystemforschung. Dort ist er für die Auswertung der Teilcheninstrumente auf den Raumsonden Galileo und Cassini sowie für die Öffentlichkeitsarbeit zuständig.



1) Die Online-Version dieses Artikels enthält eine Übersicht über aktuelle und geplante Missionen.

Abgeschlossene und geplante Planetenmissionen					
Ziel	Mission	Agentur	Start	Zeitraum	
Merkur	<a href="#">Messenger</a>	NASA	2004	2008	erster Vorbeiflug
				2008	zweiter Vorbeiflug
				2009	dritter Vorbeiflug
	<a href="#">BepiColombo</a>	ESA/JAXA	2014	2019	in Orbit (2 Sonden)
Venus	<a href="#">Venus Express</a>	ESA	2005	2006	in Orbit
	<a href="#">Planet-C</a>	Jaxa	2010	2010-?	in Orbit
Erde	<a href="#">Cluster</a>	ESA	2000	2000-2010?	in Orbit (4 Sonden)
Erdmond	<a href="#">Chandrayaan-1</a>	Indien	2008	2008-2010	in Orbit
	<a href="#">Kaguya</a>	Jaxa	2007	2008-?	in Orbit
	<a href="#">Chang'e 1</a>	China	2007	2008-?	in Orbit
	<a href="#">Smart 1</a>	ESA	2003	2004	in Orbit
Mars	<a href="#">Mars Express</a>	ESA	2003	2004-	in Orbit
	<a href="#">Phoenix</a>	NASA	2007	2007-2008	Lander
	<a href="#">Mars Reconnaissance Orbiter</a>	NASA	2005	2006-2009?	in Orbit
	<a href="#">Mars Exploration Rovers</a>	NASA	2003	2004-2009	2 Lander
	<a href="#">Mars Odyssey</a>	NASA	2001	2002-2006	in Orbit
	<a href="#">Exomars</a>	ESA	2016	2017-	Lander
	<a href="#">Mars Surface Laboratory</a>	NASA			Lander
Jupiter	<a href="#">Galileo</a>	NASA	1989	1995-2004	in Orbit
	<a href="#">Cassini</a>	NASA	1997	2000/2001	Vorbeiflug
	<a href="#">New Horizons</a>	NASA	2006	2007	Vorbeiflug
	<a href="#">Juno</a>	NASA	2011	2016	in Orbit
	<a href="#">Europa-Jupiter-System Mission</a>	ESA/NASA	2020	2025	2 Sonden in Orbit um Europa und Ganymed
Saturn	<a href="#">Cassini/Huygens</a>	NASA/ESA	1997	2004-2010(2017?)	in Orbit / Lander
	<a href="#">Titan-Saturn-System Mission</a>	NASA/ESA	2020	2029	in Orbit / Ballon /Lander
Uranus					Keine Missionen geplant
Neptun					Keine Missionen geplant
Kleinplanet Pluto	<a href="#">New Horizons</a>	NASA	2006	2015	Vorbeiflug
Kometen	<a href="#">Rosetta/Philae</a>	ESA	2004	2014-?	in Orbit um Komet 67P CG /Lander
Asteroiden	<a href="#">Near/Shoemaker</a>	NASA			in Orbit und Landung auf Eros
	<a href="#">DAWN</a>	NASA			Vorbeiflug an Ceres und Vesta
	<a href="#">Marco Polo</a>	ESA			
Trojaner		Jaxa			Vorbeiflug an Jupiter Trojaner