



PHOENIX auf dem Mars

ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH / UNIVERSITY OF ARIZONA

Die jüngste Marslandemission gilt als beendet – doch die Auswertung der Daten des Mars Phoenix ist in vollem Gange und noch für manche Überraschung gut. Auch neue Fragen haben sich ergeben, und die Folge-missionen zu ihrer Beantwortung sind schon in Vorbereitung.

Von Walter Goetz

Es waren gerade einmal 22 Fotos, die die US-Sonde Mariner 4 im Jahr 1965 vom Mars zur Erde funkte. Doch mit den Aufnahmen aus einer Nähe von bis zu 10000 Kilometern hatte eine neue Epoche der Erforschung des Roten Planeten begonnen, der wie die Erde polare Eiskappen, Wolken am Himmel und jahreszeitliche Wetterzyklen besitzt und auf dem wir vertraute geologische Strukturen wie Vulkane und Canyons vorfinden.

Andererseits ist er – zumindest heute – eine unwirtliche Welt. Doch war dies immer so? Existierte einst vielleicht flüssiges Wasser auf dem Mars, war der Planet sogar feucht und warm? Falls ja, wie kam es zu den anschließen-

den Klimaveränderungen? Haben sich auf dem Mars je Lebensformen entwickelt? Und sollte dies der Fall sein: Ähneln sie terrestrischen Lebensformen und können wir sie als solche an der Oberfläche nachweisen? Diese Fragen beflügeln die Erforschung unseres Nachbarplaneten schon seit Mitte der 1960er Jahre.

Bislang allerdings ist die Geschichte der Marsmissionen von wechselhaftem Glück geprägt. Mitte der 1970er Jahre landeten Viking 1 und Viking 2 als erste Raumsonden funktionstüchtig auf der Oberfläche des Planeten. Von ihnen stammen auch die ersten Farbaufnahmen des Roten Planeten, und sie sendeten viel länger als erwartet, bis 1982 beziehungsweise 1980, Daten zur Erde. Doch ihre Suche nach mikroskopischen Lebensformen im Marsboden lieferte widersprüchliche Resultate und

Die erfolgreiche Landung auf einem fremden Planeten ist auch heute noch keineswegs selbstverständlich. Doch dem Mars Phoenix (Illustration) gelang sie vor zwei Jahren. Anschließend untersuchte er mehrere Monate lang die Chemie des Marsbodens, Funde von Wassereis und das Wetter in den nordpolaren Regionen.

ist – nach heutigem Stand – erfolglos geblieben. Ein voller Erfolg hingegen wurde, nachdem 1993 ein Mars-Orbiter gescheitert war, der 1997 in eine Umlaufbahn eingeschwenkte Mars Global Surveyor, dessen letzte Funksignale uns im Oktober 2006 erreichten. Ebenfalls im Jahr 1997 landeten Mars Pathfinder und sein Rover Sojourner sicher auf der Oberfläche des Planeten.

1999 jedoch gingen sowohl der Mars Climate Orbiter als auch der Mars Polar Lander verloren, und im Jahr 2000 wurde die Entwicklung des ursprünglich als Kombination aus Orbiter, Lander und Rover geplanten Mars-Surveyor-Programms gestoppt. Doch immerhin fand der Orbiter neue Verwendung: Unter dem Namen Mars Odyssey startete er 2001 (und diente später als Relaisstation für die 2004 gelandeten Zwillingssrover Spirit und Opportunity). 2003 feierte die europäische Weltraumbehörde ESA auch das erfolgreiche Eintreffen des Orbiters Mars Express, lediglich der Lander Beagle blieb verschollen. 2006 schließlich erreichte der Mars Reconnaissance Orbiter die Umlaufbahn um unseren Nachbarplaneten und schießt bis heute Bilder mit höchster Auflösung.

Das jüngste Projekt ist indessen Mars Phoenix. Nachdem im Jahr 2000 Katzenjammer geherrscht hatte, weil die noch unerforschten arktischen Regionen des Mars wieder außer Reichweite gerückt waren, führte Mars Odyssey die Wende herbei. 2002 entdeckte die Sonde ebendort dicht unter der Oberfläche große Mengen an Wasserstoff (siehe »Gefrorener Ozean unter dem Marsboden«, SdW 9/2002, S. 12). Forscher interpretierten die weniger als einen Meter tief gelegenen Reservoirs als Wassereis, das die lange gesuchten organischen Substanzen und damit Hinweise auf gegenwärtiges oder früheres Leben enthalten könnte.

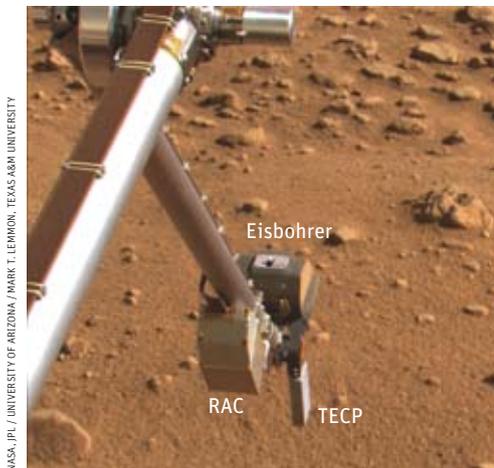
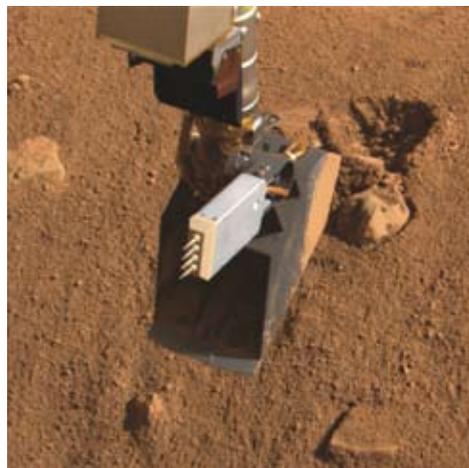
Erneut diente das Mars-Surveyor-Vorhaben als Ausgangsbasis. Sein Orbiter war im Odyssey-Projekt aufgegangen, nun diente sein Lander dem Team um Peter H. Smith von der University of Arizona in Tucson als Grundlage, um die Mission Mars Phoenix gleichsam

aus der Asche ihrer Vorgänger auferstehen zu lassen: Am 4. August 2007 startete der Phoenix, am 25. Mai des Folgejahres landete er auf dem Mars.

Seine Vor-Ort-Mission scheint zwar längst beendet. Am 2. November 2008 hörte die Bodenstation zum letzten Mal von ihm – die Sonde lieferte wohl nicht mehr genug Energie –, und die im Januar 2010 aufgenommenen Versuche, ihn nach dem Marswinter wieder aufzuwecken, erwiesen sich als vergeblich. Doch mit der Auswertung der Daten sind die Forscher bis heute beschäftigt. Phoenix lieferte optische Aufnahmen, detaillierte Analysen von Bodenproben und selbst Wetterberichte – zahllose Informationen, die nun nach und nach zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden.

Mit an Bord waren gleich mehrere abbildende Systeme: der Stereo Surface Imager (SSI) mit einer Auflösung von bis zu einem Millimeter pro Pixel, die Robotic Arm Camera (RAC) mit bis zu 24 Mikrometern pro Pixel, ein optisches Mikroskop (vier Mikrometer pro Pixel) und schließlich ein Rasterkraftmikroskop, dessen Auflösung 0,1 Mikrometer pro Pixel erreichte. Gemeinsam mit Kollegen der University of Arizona hat unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung sowohl die Roboterarmkamera RAC als auch die Fokalebene-Baugruppen des optischen Mikroskops beigesteuert.

Darüber hinaus war der Lander mit dem nasschemischen WCL-Labor (Wet Chemistry Laboratory) ausgestattet. In vier separaten, je einmal nutzbaren Zellen ließen sich Bodenproben mit flüssigem Wasser vermischen. Ionenselektive Elektroden untersuchten die erzeugte Lösung und lieferten Informationen über wasserlösliche Salze und andere Bestandteile. Weitere Proben wurden in einem Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA) auf bis zu 1000 Grad Celsius erhitzt. Die dabei



In Kürze

- ▶ Mars Phoenix gilt als **extrem erfolgreiche Mission**: Erstmals hat eine Sonde geochemische und meteorologische Daten von einem arktischen Landeplatz auf dem Mars geliefert.
- ▶ Anfang 2010 wurde versucht, das Gefährt **nach dem Marswinter wieder »aufzuwecken«** – vergeblich. Gleichwohl ist die Datenlage über Wetter, Bodenbeschaffenheit und Wasservorkommen besser als je zuvor.
- ▶ Gleichzeitig sind neue Fragen aufgetaucht. Antworten sollen **kommende Missionen wie Curiosity und ExoMars** liefern. Nach 2020 werden dann erste Rückkehrkapseln Proben zur Erde transportieren.

Die Schaufel am ausgefahrenen Roboterarm auf dem linken Foto dient zur Aufnahme von Bodenproben. Rechts ist auch der Eisbohrer auf der Schaufelrückseite zu sehen. Die Kamera RAC erlaubt einen Blick in die Schaufel und auf die Bodenprobe, während die Thermal and Electrical Conductivity Probe (TECP) die Leitfähigkeit der Bodenprobe untersucht.

DER LANDEPLATZ

Der Phoenix ging an einem Ort nieder, der 500 Kilometer nördlich der Grenze der vulkanischen Tharsis-Region und 1800 Kilometer von deren gigantischem Schildvulkan Alba Patera entfernt liegt. Weitere rund 2000 Kilometer nördlich befinden sich die Eiskappe des Nordpols und die zirkumpolaren Dünen. Zu den Kriterien bei der Auswahl des Landplatzes zählte die hohe Wahrscheinlichkeit, dort auf Wassereis zu stoßen; außerdem durfte das Gelände nicht zu steil abfallen und musste vergleichsweise frei von Geröll sein.

frei werdenden Gase ließen sich massenspektroskopisch identifizieren, und die Temperaturen, bei denen sie entstanden, grenzten die Identität ihrer (möglicherweise organischen) Ursprungsubstanzen ein. Zudem konnten endotherme Phasenübergänge erkannt werden, solche also, bei denen die (kontrollierte) Zufuhr von Wärmeenergie nicht zu entsprechend höheren Temperaturen führte.

Schließlich verfügte der Lander über einen 2,3 Meter langen Roboterarm mit einer Schaufel, an deren Rückseite auch ein Eisbohrer installiert war. Damit ließen sich gezielt Bodenproben aufnehmen und an verschiedene Systeme weiterreichen. So zeigte die am Arm befestigte RAC-Kamera aufgenommene Bodenproben in hoher Auflösung, und ein Sensor mit vier Nadeln maß ihre elektrische und thermische Leitfähigkeit. Weitere Sensoren erfassten den Druck des atmosphärischen Wasserdampfs und die relative Luftfeuchte.

Für die »Wetterberichte« war ein von der kanadischen Raumfahrtbehörde entwickelter meteorologischer Mast zuständig. Sein wichtigstes Instrument war ein LIDAR-Laser (Light Detection and Ranging), der die vertikale Struktur der Atmosphäre untersuchte, in-

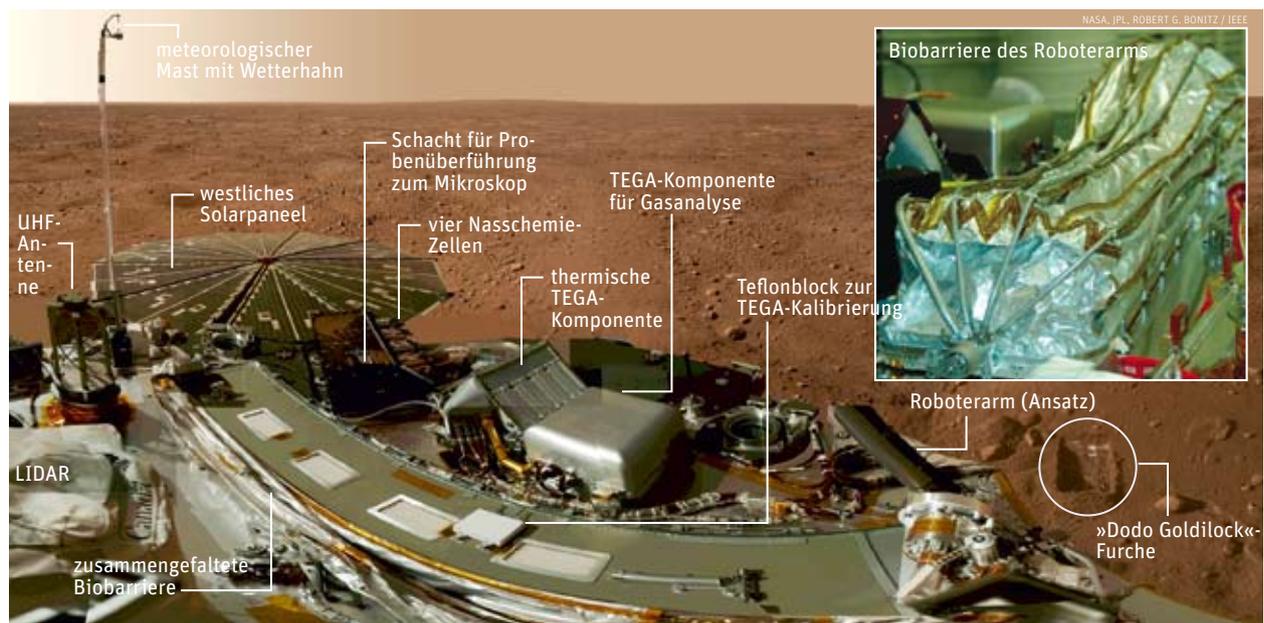
dem er die Laufzeit der Strahlung maß, die an Staub- und Eispartikeln in der Luft zurückgestreut wurde. In 25, 50 und 100 Zentimeter Höhe über dem Lander waren außerdem Druck- und Temperatursensoren am Mast montiert, und an seiner Spitze befand sich ein in Dänemark entwickeltes Windmessgerät, der »Wetterhahn«. Komplementäre Daten über atmosphärischen Staub und Wasserdampf lieferte der SSI, der die Sonnenscheibe durch optische und nahinfrarote Filter fotografierte.

Das erste Bild, das die Kamera nach der Landung schoss, zeigt eine von den Landedüsen frei gelegte helle, ebene Oberfläche, die »Holy Cow«. Die Eisfunde darin zeigen, dass sich das 2002 von der Odyssey entdeckte Eis tatsächlich nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche befindet. Auf den meisten Bildern ist allerdings nicht reines Wassereis, sondern stark eishaltiger Regolith (eishaltiges Boden- und Gesteinsmaterial) zu sehen. In einem weiteren eishaltigen Bodenbereich in direkter Nachbarschaft, der ebenfalls durch die Bremsraketen entstandenen »Snow Queen« (die meisten Namen von Oberflächendetails wurden der Welt der Märchen und Kindergeschichten entlehnt), entwickelten sich im Verlauf von 50

SELBSTPORTRÄT AUF EINER FERNEN WELT

Einer für fast alles: Zahlreiche Instrumente des Phoenix zeigt dieses Mosaikbild, dessen Einzelfotos die Stereokamera SSI schoss. Von links nach rechts sind das LIDAR-Lasersystem und der meteorologische Mast mitsamt dem Wetterhahn zu sehen, die der Wetterbeobachtung dienen. Die Datenübertragung zu Sonden im Orbit erfolgte über eine UHF-Hochfrequenzantenne. Außerdem im Bild: eines der Solarpaneele für die Stromversorgung. Bodenproben wurden über einen Schacht zum optischen Mikroskop überführt und konnten außerdem in vier nasschemi-

schen Zellen analysiert werden. In der Instrumentengruppe TEGA (der ein von organischem Material freier Teflonblock als Kalibrationsreferenz diente) ließen sich die Proben erhitzen und die dabei freigesetzten Gase untersuchen. Rechts ist der Ansatz des Roboterarms zu erkennen (der auf den anderen Bildern des Mosaiks nicht im Blickfeld war). In der Furche »Dodo Goldilock« (Kreis) suchte der Lander nach Eis. Das kleine Bild oben rechts zeigt die faltbare »Biobarriere«, die den Roboterarm bis zur Landung auf dem Mars vor biologischer Kontamination schützte.



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / MARK T. LEMMON, TEXAS A&M UNIVERSITY

Marstagen («Sols») durch Sublimation zahlreiche Risse, nachdem die thermisch isolierende obere Bodenschicht verloren gegangen war.

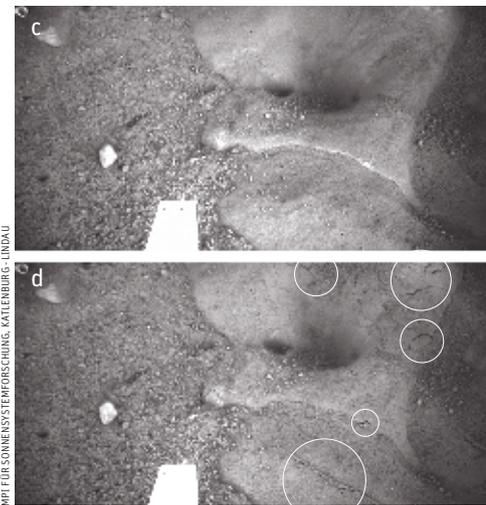
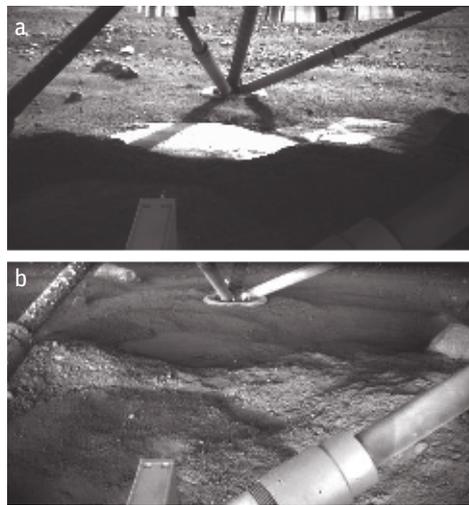
Im Verlauf der Mission grub der Roboterarm zwölf bis zu 18,3 Zentimeter tiefe Furchen. In einigen wie etwa »Dodo Goldilock« fand sich, bestätigt durch die SSI-Spektren, nahezu reines Eis, in anderen eisreicher Regolith, in manchen überhaupt kein Eis. Helle, zentimetergroße Klumpen in der »Dodo Goldilock«-Furche, die im Verlauf von vier Sols verschwanden, galten den Forschern als weiteres Indiz dafür, dass es sich bei dem hellen Material unmittelbar unter der Oberfläche tatsächlich um Wassereis handelte. Warum aber das Mischungsverhältnis von Eis und Regolith auf kurze Distanzen so stark variiert, bleibt weiterhin unklar.

Erstaunlicher Perchloratfund

Manche Bodenauffälligkeiten lassen sich indessen durch die klimatischen Bedingungen der polaren Regionen erklären. Hier ist die Landschaft von Aufwölbungen übersät, die meist einige Meter Durchmesser aufweisen. Ein Modell für die Bildung solcher »polygoner« Strukturen hat ein Team um Ronald Sletten an der University of Washington entwickelt. Ihm zufolge führt die jahreszeitliche Kontraktion und Expansion des Bodens zur Entstehung keilförmiger Risse. Im Winter lagert sich darin feinkörniges Material ab, weshalb sie sich im nächsten Sommer nicht wieder vollständig schließen. Durch die Ausbildung von Hügeln («Polygonen») wird schließlich die erzeugte jahreszeitliche Spannung gemildert.

So kommt es zu einem Erosionsprozess, einem langsamen zyklischen Transport von Oberflächenmaterial, wie er auch in irdischen arktischen Regionen auftritt, wo er als Kryoturba-tion bezeichnet wird. Er erneuert auf kurzen Zeitskalen kontinuierlich die Landschaft (siehe Grafik S. 29) und hat wohl auch dazu beigetragen, dass Phoenix nicht auf Auswurfmaterial des Heimdall-Kraters gestoßen ist. Dieser vor 500 Millionen Jahren entstandene Krater – mit elf Kilometer Durchmesser und einem Kilometer Tiefe – befindet sich gerade einmal 20 Kilometer westlich vom Landeplatz.

Die große Vielfalt von Bodenpartikeln untersuchte Phoenix mittels mikroskopischer Farbaufnahmen und dreidimensionaler Darstellungen des Rasterkraftmikroskops. Unklar ist, inwieweit die untersuchten Partikel repräsentativ für den Marsstaub im Allgemeinen sind. Am Landeplatz dominieren rötlich orangefarbene Teilchen, die kleiner als zehn Mikrometer sein müssen, da sie vom Mikroskop nicht aufgelöst werden. Daneben gibt es auch



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / ROBERT LANGE, GLENN AND W. J. MARKIEWICZ, MPI FÜR SOLARSYSTEMFORSCHUNG, KATLENBURG, LINDAU

deutlich größere braune und schwarze Schluff- und Sandpartikel. Genauere Hinweise auf ihren Ursprung werden aber erst Vergleiche mit irdischen Böden liefern.

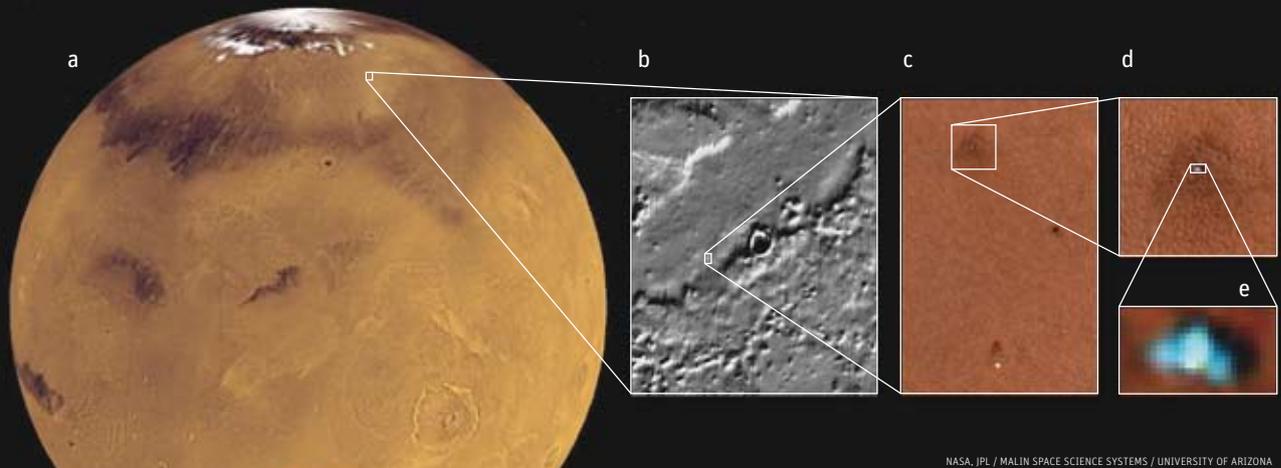
In den Zellen des WCL-Nasschemielabors entstand bei der Mischung von Bodenproben mit wässriger Lösung eine schwach alkalische Lösung, in der die Elektroden eine überraschend hohe Menge an Perchlorat entdeckten, also anionische ClO_4^- -Moleküle. (In geringeren Mengen ließen sich auch, in absteigender Reihenfolge, Kationen von Magnesium, Natrium, Kalzium und Kalium nachweisen.) Der Fund ist erstaunlich. Forscher um Michael Hecht vom kalifornischen Jet Propulsion Laboratory gehen davon aus, dass der Perchloratanteil am Marsboden bei etwa einem Gewichtsprozent liegt, was entsprechende Vorkommen in einigen irdischen Wüstenböden um mehrere Größenordnungen übersteigt. Ist ClO_4^- aber nur am Landeplatz oder tatsächlich überall auf dem Mars verbreitet, wie frühere Chlorfunde zumindest vermuten lassen? Und welche primitiven Lebensformen könnten sich angesichts einer so hohen Konzentration im Boden überhaupt entwickelt haben?

Auf die Anwesenheit von Perchlorat ließen die von WCL gemessenen Ionenkonzentrationen und weitere Parameter zwar nur indirekt schließen; dennoch gilt sie als gesichert, da

Der Blick der Roboterarmkamera unter den Lander zeigt die von den Landedüsen des Phoenix frei gelegte Fläche »Holy Cow«. Der Leitfähigkeitssensor TECP ist als helles Rechteck zu sehen. Auf den meisten Bildern erscheint die »Holy Cow« hell und reflektierend (Bild a), im rötlichen Licht der Dämmerung gleicht sie sich aber dem umgebenden Marsboden an (b), woraus die Forscher schließen, dass sie hier nicht auf reines Eis gestoßen sind. Die benachbarte »Snow Queen« war zunächst glatt (c), zeigte jedoch nach etwa 50 Marstagen infolge der täglichen Temperaturzyklen Risse an der Oberfläche (d, weiße Kreise).



ZOOM AUF DEN LANDER



NASA, JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS / UNIVERSITY OF ARIZONA

Der Landeplatz des Phoenix liegt nahe der nördlichen Polkappe (a). Die Schwarz-Weiß-Aufnahme des Mars Global Surveyor (b) zeigt ein 280 Meter breites Areal, in dem der Landeplatz links vom kreisförmigen Heimdall-Krater zu sehen ist. Das folgende Bild (c) nahm der Mars Reconnaissance Orbiter 22 Stunden nach der Landung auf. Hier sind der Lander selbst, aber auch der abgestoßene

Hitzeschild (schwarzer Punkt rechts von der Bildmitte) und der Fallschirm (heller Punkt unten) zu erkennen. In der Vergrößerung (d) werden Unebenheiten des Bodens und grobkörniges, von den Landedüsen frei gelegtes Material deutlich. Eine letzte Vergrößerung (e, mit einer Auflösung von etwa 33 Zentimeter pro Pixel) zeigt schließlich den Lander und die beiden Solarpaneele.

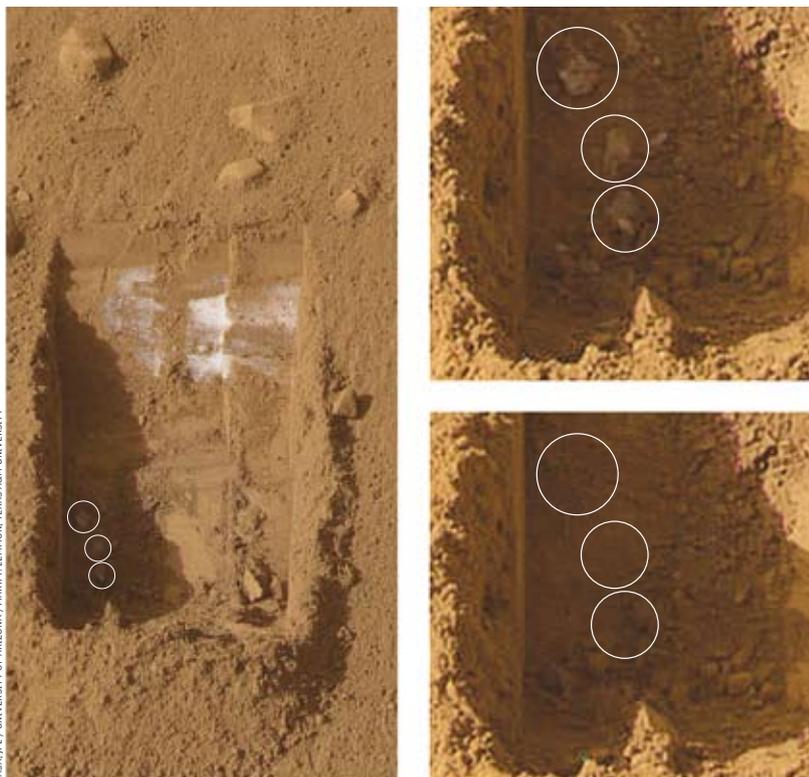
Am einen Ende der rund 20 Zentimeter breiten Furche »Dodo Goldilock« fand sich fast reines Wassereis (links). Die Kreise markieren Anhäufungen von etwa zwei Zentimeter großen Eispartikeln (Detail rechts oben), die binnen vier Sols (Marstagen) nach dem Graben vermutlich infolge von Sublimation verschwunden waren (rechts unten).

andere Interpretationen der Daten kaum möglich sind. TEGA indessen wies rätselhafterweise nur in einem einzigen Fall ein mögliches Zerfallsprodukt nach: Bei der Erhitzung einer Bodenprobe von »Baby Bear« wurde die Freisetzung von molekularem Sauerstoff beobachtet, der aus Perchlorat hervorgegangen sein könnte. Allerdings müssen die Informationen über die Konzentrationen wasserlöslicher Komponenten im Marsboden durch weitere Instrumente ohnehin noch verfeinert werden, denn jede WCL-Elektrode reagiert, auch abhängig von der tatsächlichen Konzentration,

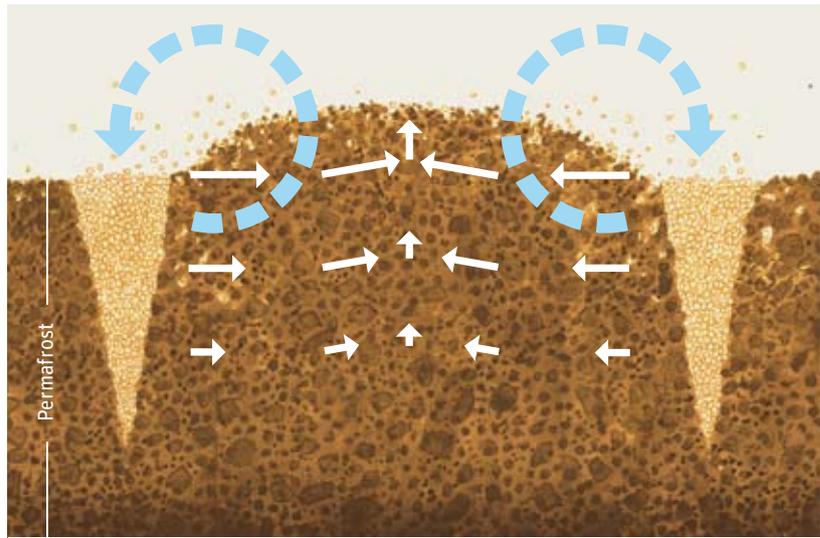
mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auf verschiedene Ionentypen.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der massenspektroskopischen Analysen war die Freisetzung von Kohlendioxid bei Temperaturen von 800 bis 900 Grad – ein Hinweis auf das von jeher erwartete und lange vermisste Kalziumkarbonat! Forscher um William V. Boynton von der University of Arizona gehen von einem Anteil von drei bis fünf Gewichtsprozent im Marsboden aus. Meist entstehen solche Karbonate durch Ausfällung aus wässrigen Lösungen – der Fund von Kalziumkarbonat zeigt also, dass am Phoenix-Landeplatz irgendwann einmal flüssiges Wasser existiert hat. Die Entdeckung gilt als bestätigt, weil sie auch mit den Interpretationen der WCL-Daten vereinbar ist, wie ein Team um Samuel P. Kounaves von der Tufts University in Massachusetts nachwies.

Überraschenderweise wurde über den gesamten Temperaturbereich des Thermal Analyzer von unter 0 bis 1000 Grad Celsius aber kein Schwefeldioxid frei, obwohl alle früheren Landemissionen erhebliche Schwefelmengen nachgewiesen hatten. Magnesiumsulfat wäre, bei einem atmosphärischen Druck von sieben Millibar, kurz vor Erreichen der Maximaltemperatur zerfallen, war also nicht in den Proben vorhanden. Mit dem Vorhandensein von Kalziumsulfat hingegen, das schon zuvor in großen Mengen nahe der nordpolaren Eiskappe gefunden worden war, hatten die Forscher fest gerechnet; es zerfällt allerdings erst bei etwa 1400 Grad Celsius. Nach der Analyse aller Daten kam ein Team um NASA-Forscher D.C. Golden dennoch zum Schluss, dass am Landeplatz des Phoenix – wie auch in den



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / MARK T. LEMMON, TEXAS A&M UNIVERSITY



Kryoturbation sorgt nahe der polaren Eiskappe für die Entstehung unregelmäßiger Aufwölbungen, welche dort die Marsoberfläche prägen (links). Denn im Winter bilden sich keilförmige Spalten im Boden (Grafik), in die feinkörniges Material fällt, so dass sie sich im Sommer nicht mehr vollständig schließen. Die resultierenden Spannungen im Boden lassen das Material wandern (weiße Pfeile) und so »polygone« Hügelformen entstehen. Die blauen Pfeile illustrieren den längerfristigen Materialtransport.

meisten bislang analysierten Marsböden – neben Kalziumkarbonat mit höchster Wahrscheinlichkeit auch Kalziumsulfat vorhanden ist.

Auch die meteorologischen Messverfahren des Phoenix erlaubten vielfältige Analysen, deren Ergebnisse sich durch Beobachtungsdaten aus dem Orbit weiter absichern ließen. Insbesondere untersuchte der Lander ausgeprägte Wetterphänomene, wie sie für die polaren Regionen typisch sind, vor allem die bereits von Bildern aus der Umlaufbahn bekannte Wolkenbildung. Der Wetterhahn lieferte zudem Daten über Windrichtung und -geschwindigkeit, die nun in die Entwicklung von Wettermodellen einfließen.

Staubtornados zogen am Landeplatz vorüber

Der Druck des atmosphärischen Wasserdampf steigt, wie die Messungen des Feuchtigkeitssensors zeigen, zwischen 2 Uhr und 10 Uhr Ortszeit an, um bei etwa 1,8 Pascal ein Plateau zu erreichen, auf dem er für den größten Teil des Tages verbleibt, wohingegen die Temperatur der Atmosphäre bis 14 Uhr weiterhin ansteigt. Nach 10 Uhr pegelt sich dank atmosphärischer Konvektion ein konstanter Gleichgewichts-Wasserdampfdruck ein. Wie an den Landeplätzen des Mars Pathfinder und des Rovers Spirit wurden auch hier Staubteufel beobachtet, die mit Geschwindigkeiten von fünf bis zehn Meter pro Sekunde in der Nähe vorüberzogen.

Im späteren Missionsverlauf erwiesen sich die LIDAR-Daten als besonders wichtig. Ihre Auswertung durch James A. Whiteway von der kanadischen York University und seine Kolle-

gen zeigten, dass sich ab Sol 80 in jeder Nacht Bodennebel sowie Wolken aus Wassereis in einer Höhe von etwa vier Kilometern nahe der Obergrenze der atmosphärischen Grenzschicht bildeten. Viele dieser Wolken wiesen die auch auf der Erde bekannten »Fallstreifen« auf: Eiskristalle, die eine bestimmte Größe erreicht haben, so dass sie durch die Atmosphäre zu fallen beginnen und sublimieren. Tagsüber indessen wurden die vom LIDAR entsandten Lichtpulse durch atmosphärischen Staub zurückgestreut, noch bevor sie höher liegende Wolken erreichten. Der SSI wiederum entdeckte gegen Ende der Mission auch am Taghimmel viele Wolken, die in einigen Fällen binnen zehn Minuten durch Sublimation wieder verschwanden.

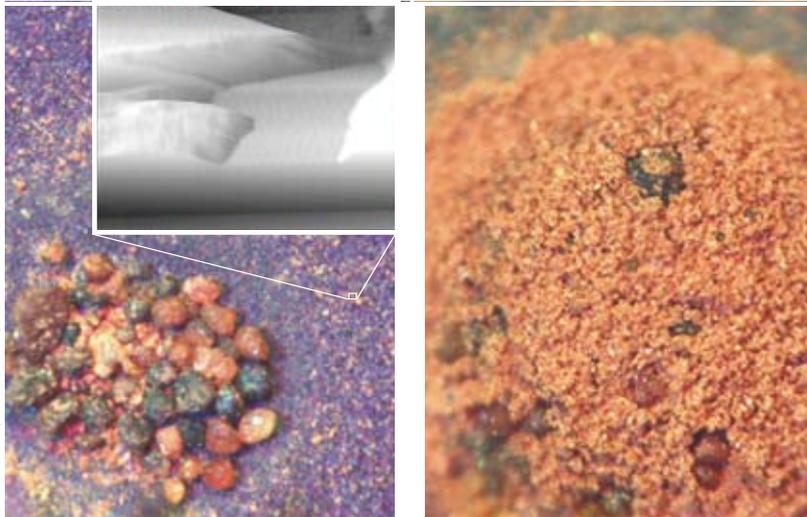
Zum Verständnis des täglichen lokalen Wasserkreislaufs hat die Phoenix-Mission wesentlich beigetragen: In den Morgenstunden gelangt Wasserdampf in die Atmosphäre, der aus dicht unter der Oberfläche liegendem Eis stammt oder auch aus Wasser, welches entweder an das körnige Material des Marsbodens gebunden ist oder als Kristallwasser in Mineralen oder Salzen (wie Magnesiumperchlorat) vorliegt. Im Verlauf der Nacht gefriert der atmosphärische Wasserdampf aus und es bilden sich Fallstreifen. In einigen Fällen kam es aber auch zu Schneefall, bei dem die Fallstreifen bis zur Oberfläche herabreichen.

Phoenix war insgesamt 152 Sols in Betrieb, vom 26. Mai bis zum 2. November 2008, also vom späten Frühling bis zum späten Sommer des rund 23 Erdmonate dauernden Marsjahrs. Vom 1. April bis zum 10. Juli 2009 herrschte am Landeplatz dann die Dunkelheit der Polarnacht. Nun ist die Sonne zwar längst wie-

LANDEPLATZ DURCH EINSCHLAG »GERÄUMT«?

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl des Landeplatzes hatte in der Tatsache bestanden, dass sich dort nur Felsen oder Steine mit Durchmessern von weniger als etwa 50 Zentimetern finden. Doch warum ist das so? Möglicherweise hat die Energie des Einschlags, der den nahe gelegenen Heimdall-Krater entstehen ließ, das unter der Oberfläche liegende Eis und andere kondensierte flüchtige Stoffe explosionsartig verdampfen lassen, wodurch die größeren Felsbrocken zerstört und weggefegt wurden.

FARBPHOTOS: NASA, JPL, MICHAEL H. HECHT / UNIVERSITY OF ARIZONA / W. THOMAS PIKE, IMPERIAL COLLEGE LONDON; KLEINES SW-FOTO: NASA, JPL / URS STAUFER, TU Delft, NIEDERLANDE



Unter dem Mikroskop zeigt sich eine Mischung aus hellen und dunklen, rund 60 Mikrometer großen Körnchen (links), eingebettet in rötlich orangefarbene, knapp zehn Mikrometer große Staubpartikel (rechts). Die Detailaufnahme eines Partikels (linkes Bild, oben) stammt vom Rasterkraftmikroskop des Phoenix. Die Mineralogie der einzelnen Teilchen ist noch nicht völlig aufgeklärt.

Aufschluss über Wolken und Bodennebel, die sich nachts bildeten, gab das vom Laserinstrument LIDAR vermessene Streulicht aus der Atmosphäre (links). Eiswolken in der atmosphärischen Grenzschicht in etwa vier Kilometer Höhe zeigen oft Fallstreifen – Eiskristalle, die zunächst frei fallen und dann sublimieren (rechts).

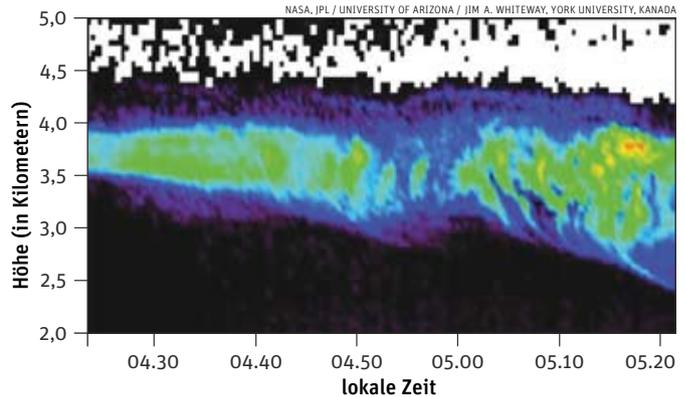
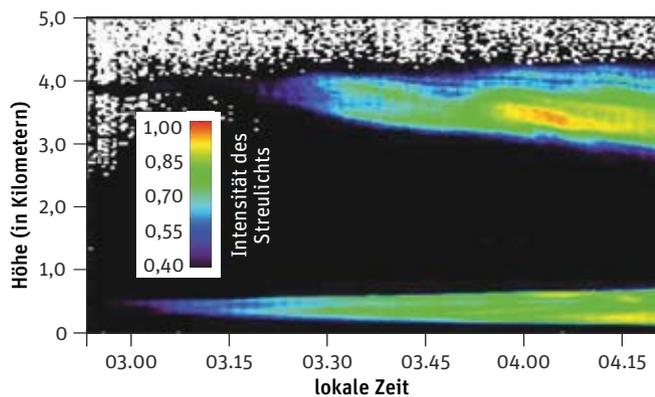
der über dem Lander aufgegangen, doch er rührt sich nicht mehr. Vergeblich hatte die Mars Odyssey am 18. Januar 2010 begonnen, nach seinen Signalen zu lauschen. Hätte Phoenix die winterlichen Temperaturen von bis zu 150 Kelvin überstanden – womit niemand ernsthaft rechnete –, hätten ihn die Forscher im »Lazarus-Modus« wiedererwecken können. Doch bei solcher Kälte werden Materialien spröde und brechen, es treten Leitfähigkeitsprobleme bei Platinen auf, und die Batterien werden tiefentladen. Vor allem aber dürfte sich bis zum Spätwinter im September 2009 eine rund 30 Zentimeter dicke Schicht von ausfrierendem atmosphärischem Kohlendioxid auf den Solarpaneelen abgelagert haben. Ihr Gewicht von mehr als einer Tonne pro Paneel hat eines oder auch beide Module wohl schlicht abbrechen lassen.

Trotzdem gilt Phoenix bereits jetzt als extrem erfolgreich: Erstmals lieferte eine Sonde geochemische und meteorologische Daten von einem arktischen Landeplatz auf dem Mars. Die Hoffnung auf den Fund von Leben ist aber drei Jahrzehnte nach den biologischen Experimenten der Viking-Landesonden erneut enttäuscht worden. Wie sollen wir nun weitersuchen?

Klar ist: Der schwierige Schritt hin zu mehrzelligen Lebewesen hat auf dem Mars sicher nie stattgefunden; auch die Erde brachte solche Organismen erstmals im Präkambrium vor knapp einer Milliarde Jahren hervor, also sehr spät in ihrer Geschichte. Doch bislang sind wir nicht einmal auf Spuren organischen Materials gestoßen. Erst wenn wir in geschützteren Regionen wie dem Inneren von Sedimentgesteinen oder tieferen Bodenschichten suchen, dürfen wir hoffen, fündig zu werden. Parallel dazu müssen wir die chemische Reaktivität des Bodens und seiner Oberfläche sowie dessen Wohnbarkeit abschätzen und terrestrische Lebensformen identifizieren, die unter diesen Bedingungen gedeihen. Geochemische und mineralogische Studien können Aufschluss auf frühere Bedingungen wie Salzgehalte, Temperaturen und Wasserkreisläufe geben, und organische Untersuchungen müssen sich den leichten Elementen der ersten und zweiten Hauptgruppe des Periodensystems widmen. Dem eventuellen Nachweis und der Identifizierung solcher Moleküle würde dann die Schlüsselfrage folgen: Wurden sie durch Meteoriten oder Kometen »importiert« oder bezeugen sie eigenständige biologische Aktivität?

Was zu tun ist, soll in den nächsten Jahren eine Reihe neuer Missionen erledigen. Ab 2012 wird der NASA-Rover Curiosity erstmals die Methode der Röntgendiffraktion zur Mineralanalyse anwenden und so eine nahezu vollständige Bestandsaufnahme der Mineralien in Böden und Gesteinen leisten. Und natürlich soll er mittels SAM, dem bereits flugbereiten NASA-Instrument Sample Analysis at Mars, auch atmosphärisches Methan aufspüren – selbst in Konzentrationen von weniger als einem Molekül pro einer Milliarde Luftmoleküle.

Ob es geochemischen Ursprungs ist oder tatsächlich von Mikroben im Untergrund stammt (weit über 90 Prozent der Methanvorkommen in der Erdatmosphäre sind biologischen Ursprungs), wird man aber auch dann noch nicht wissen. In relativ großen Mengen



WO IST PHOENIX JETZT?

Nach der harten Polarnacht hat sich der Phoenix nicht wieder aus der Asche erhoben. Diese Aufnahmen der Stereokamera des Mars Reconnaissance Orbiter zeigt die Sonde im Spätfrühjahr an Sol 21 der Mission, mitten im Marswinter und im Frühjahr



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

(von links nach rechts). Die Bilder sind näherungsweise eingeordnet, und die abgebildete Fläche misst rund 40 mal 45 Meter. Die Schatten der Solarpaneele im linken Bild verlaufen in Richtung Nordosten, was einem Aufnahmezeitpunkt am frühen Nachmittag lokaler Zeit entspricht.

Das stark verrauschte mittlere Bild wurde wenige Tage nach Ende der Polarnacht bei geringer Lichtintensität aufgenommen, als die Sonne nur ein Grad über dem Horizont stand. Im rechten Bild erscheint die Sonde asymmetrisch; mögliche Ursache könnte die Beschädigung eines Solarpaneels durch das darauf lastende Trockeneis sein.

wurde das Schlüsselmolekül bislang in der Marsregion Syrtis Major entdeckt, einer großen, dunklen Oberflächenstruktur. Messungen, die ein Team um NASA-Forscher Michael Mumma im Jahr 2009 von der Erde aus vornahm, ergaben zeitweilige Konzentrationen von bis zu 20 Molekülen pro Milliarde Luftmoleküle, die allerdings im Widerspruch zu Modellen der Marsatmosphärenchemie stehen und kontrovers diskutiert werden. Diesen Streit wird erst SAM schlichten können.

Ab 2020 mit Rückflugticket?

Im Jahr 2013 wird dann ein Orbiter folgen: Das NASA-Projekt MAVEN soll die äußeren Regionen der Marsatmosphäre und ihre Wechselwirkung mit dem Sonnenwind untersuchen. Diese Daten können in theoretische Modelle einfließen, aus denen sich die meteorologischen Bedingungen früherer Zeiten rekonstruieren lassen. Möglicherweise war es ja auch die dünne Marsatmosphäre, welche die biologische Aktivität an der Oberfläche des Planeten nicht ausreichend förderte oder gar verhinderte. Denn schließlich lehrt uns das Beispiel Erde, dass die Atmosphäre neben den Ozeanen das entscheidende Medium für die Entwicklung von Leben war.

Zugleich ist sie ein hochsensibler Indikator für Leben: »Diagnostische Moleküle« wie Methan sind selbst in geringsten Konzentrationen aussagekräftige Marker für biologische Prozesse. Die gezielte Suche nach solchen Molekülen soll daher ab 2016 der Mars Trace Gas Orbiter der ESA aus einer Umlaufbahn heraus fortsetzen und dabei insbesondere auch ihre Quellen lokalisieren.

Dann, voraussichtlich im Jahr 2018, wird mit ExoMars erstmals ein ESA-Rover auf den Weg geschickt und mit seinem Bohrer bis in eine Bodentiefe von zwei Metern vordringen. Das Gefährt soll mit dem Mars Organic Molecule Analyser (MOMA) ausgestattet sein, den gegenwärtig das MPI für Sonnensystem-

forschung entwickelt. MOMA wird Moleküle oder ihre Bruchstücke und Derivate auf bis 1000 Grad Celsius erhitzen oder durch Laserstrahlen in die Dampfphase überführen, um sie mittels eines Massenspektrometers zu identifizieren. Organische Moleküle mittlerer Gewichtsklasse, entsprechend etwa 100 bis 600 atomaren Masseneinheiten, kann das Instrument schon in sehr geringer Konzentration nachweisen. Methoden der Ramanspektroskopie, Röntgendiffraktion und Röntgenfluoreszenz sowie der Nahinfrarotmikroskopie zur mineralogischen Untersuchung des Bodens ergänzen schließlich das Instrumentarium.

Die Zukunft von ExoMars hängt allerdings vom Erfolg des Curiosity-Rovers ab, denn beide sollen dieselbe Landetechnologie nutzen. Bewährt sie sich nicht, muss auch ExoMars neu überdacht werden, ebenso wie MAX-C, der Mars Astrobiology Explorer Cacher der NASA. MAX-C soll gemeinsam mit ExoMars in derselben Landesohle, der *aeroshell*, auf den Mars gelangen. Dank der größeren Mobilität und Reichweite des Rovers wird er einerseits ExoMars den Weg weisen und darüber hinaus einen großen Probenbehälter besitzen, den allerdings erst eine Folgemission zur Erde zurückbringen soll.

Die vielfältige Morphologie und Mineralogie der Marsoberfläche sind uns durch die Missionen in der ersten Dekade des Jahrhunderts deutlich vor Augen geführt worden. Damit ist klar: Für den Erfolg der Rover wird die Wahl ihres Landeplatzes ausschlaggebend sein. Im Erfolgsfall werden ExoMars und MAX-C aber auch das Ende einer Epoche markieren – als die letzten großen Missionen, die nicht zum Transport von Marsproben zur Erde vorgesehen sind. Das werden erst ihre Nachfolger leisten: In der dritten Dekade heben hoffentlich die ersten Sample-Return-Missionen ab, um den Roten Planeten nicht nur zu erreichen, sondern auch wieder von dort zurückzukehren.



Walter Goetz, der 2002 am Center for Planetary Science der Universität Kopenhagen promovierte, arbeitet als Physiker am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg-Lindau. Im Jahr 2004 nahm er an der dreimonatigen Primärmission der Mars Exploration Rover am kalifornischen Jet Propulsion Laboratory teil. 2008 folgte die Mitwirkung an der Phoenix-Primärmission an der University of Arizona in Tucson. Derzeit wirkt er auch am Bau von Instrumenten für den geplanten europäischen Rover ExoMars mit.

© American Scientist
www.amsci.org

Hecht, M. H. et al.: Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site. In: Science 325(5936), S. 64 – 67, 3. Juli 2009.

Smith, P. H. et al.: H₂O at the Phoenix Landing Site. In: Science 325(5936), S. 58 – 61, 3. Juli 2009.

Zahlreiche Weblinks zu diesem Thema und den ergänzenden Text »Warum Mars?« finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1022877.