



**A**m 4. Januar 2004 landete der Rover *Spirit* erfolgreich im Krater Gusev auf dem Mars, sein Kollege *Opportunity* kam drei Wochen später am 25. Januar in der Ebene Meridiani in einem kleinen Krater zum Stehen. Mitte 2003 hatte die NASA die beiden Spürnasen im Rahmen der Mission *Mars Exploration Rovers* zum Roten Planeten geschickt. Ihre Aufgabe: eine Gesteinsanalyse vor Ort. „Wir hatten Tausende von Bildern von der Mars-oberfläche“, sagt Johannes Brückner vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz,

Die Rover sind nun selbstständig auf dem Mars unterwegs, denn für eine direkte Steuerung von der Erde aus ist die Laufzeit der Radiosignale zu lang. Also bekommen *Spirit* und *Opportunity* die ausgewählten Probenstellen von der Kontrollstation auf der Erde angezeigt. Am Ziel angekommen schicken sie Fotos zur Berichterstattung zur Erde zurück. Befindet sich eine interessante Probe im Arbeitsbereich des Arms, werden die Instrumente von der Bodenstation aus in Position gebracht, um die Messungen durchzuführen.

## Expedition zum Mars – was Forscher auf dem Roten Planeten fanden

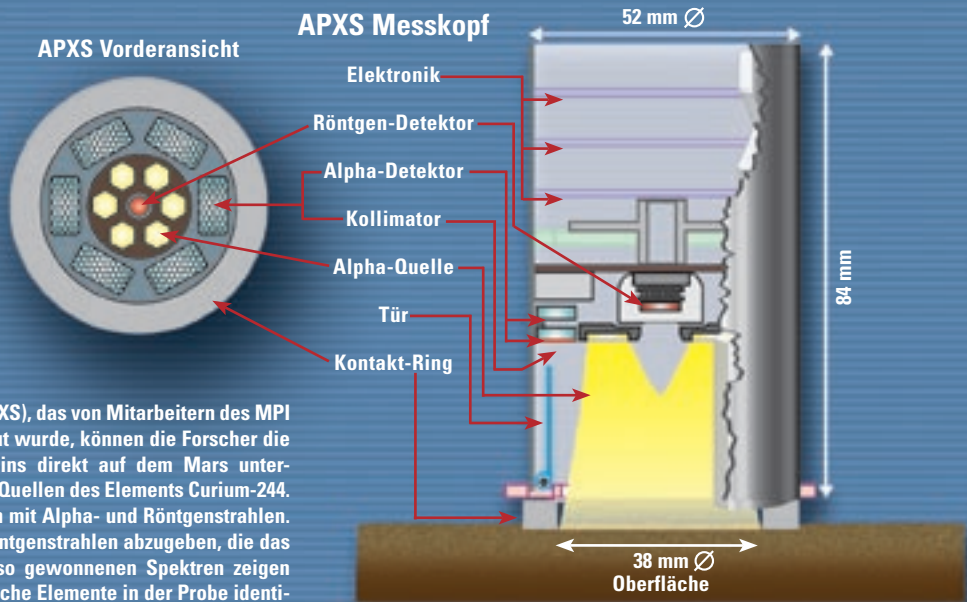
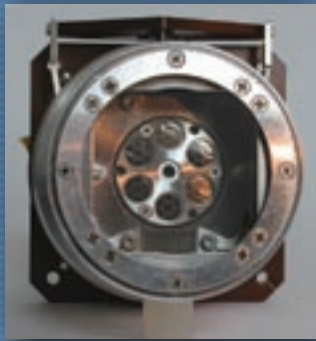
„aber wir wussten nicht, auf welches Material wir schauen.“ Mitarbeiter der Abteilung Kosmochemie haben das APXS, das Alpha-Röntgen-Spektrometer (engl. *Alpha Particle X-Ray Spectrometer*) für die chemische Analyse von Gesteinen entwickelt und gebaut (**Abb. B**). Es ist zusammen mit einem Mössbauer-Spektrometer (für mineralogische Analysen) von der Universität Mainz, einer amerikanischen Mikroskopkamera und einem Gesteins-schleifer an dem beweglichen Arm der beiden mobilen Feldgeologen montiert.

Am 5. Januar, einen Tag nach der Landung von *Spirit*, führten die Wissenschaftler zum ersten Mal einen Funktionstest durch. Um 8:22 Uhr MEZ wurde das erste Spektrum im



► Der Mars-Erkundungs-Rover bereitet Messungen an einem Stein vor.





Mit dem Alpha-Röntgen-Spektrometer (APXS), das von Mitarbeitern des MPI für Chemie in Mainz entwickelt und gebaut wurde, können die Forscher die chemische Zusammensetzung des Gesteins direkt auf dem Mars untersuchen. Der Messkopf enthält radioaktive Quellen des Elements Curium-244. Diese „bombardieren“ die Gesteinsproben mit Alpha- und Röntgenstrahlen. Daraufhin fangen die Proben selbst an, Röntgenstrahlen abzugeben, die das Gerät mit einem Detektor auffängt. Die so gewonnenen Spektren zeigen Linien, anhand derer sich einzelne chemische Elemente in der Probe identifizieren lassen, beispielsweise Natrium, Aluminium, Silizium, Kalium, Kalzium, Eisen und Zink.



→ NASA-Kontrollzentrum in Pasadena, Kalifornien, empfangen. Da der Instrumentenarm noch eingefahren war, sah das APXS nur Marsatmosphäre. Das gemessene Röntgenspektrum lieferte nichts wirklich Neues – die Zusammensetzung der Marsatmosphäre war bekannt –, aber es belegte: Das APXS hat die lange Reise gut überstanden und arbeitet einwandfrei auf der Marsoberfläche!

Heftige, periodisch auftretende Staubstürme sorgen auf dem Mars für weite Transportwege und eine gute Durchmischung der Stäube. Alle Oberflächen, Steine und Böden sind daher von einer dünnen Staubschicht bedeckt. Auch die erste Staubmessung des APXS auf Rover *Opportunity* nach der Landung im Krater *Eagle* zeigte in der chemischen Zusammensetzung keine großen Unterschiede zu anderen Landstellen; die Messungen seines Zwillingbruders *Spirit* im Gusev-Krater auf der gegenüberliegenden Äquatorseite lieferten sehr ähnliche Werte: Die Röntgenspektren zeigen die charakteristischen Linien aller wesentlichen gesteinsbildenden Elemente (Natrium, Magnesium, Aluminium, Silizium, Kalium, Kalzium, Titan und Eisen) sowie die für Marssand charakteristischen Linien von Schwefel und Chlor.

*Spirit* und *Opportunity* sollten aber vor allem helfen, eine Frage zu beantworten: Könnte es sein, dass auf dem heute staubtrockenen Mars vor Milliarden Jahren Wasser floss? Ohne Wasser kein Leben – viele Marsfor-

scher konzentrieren sich daher ganz auf das Aufspüren von Wasser. Tatsächlich fanden beide Rover Hinweise darauf, dass es in der Frühphase des Planeten vor drei, vier Milliarden Jahren Wasser auf seiner Oberfläche gegeben haben muss. So war die Landestelle von *Opportunity* mit kugelförmigen Körnchen bedeckt, die von den Forschern den Spitznamen *Blueberries*, Heidelbeeren, bekamen. Diese Kügelchen haben einen sehr hohen Eisengehalt und bestehen zum größten Teil aus Hämatit, einem Eisenoxid-Mineral. Hämatit entsteht meist nur in einer oxidierenden und wasserreichen Umgebung. Außerdem hat das Mössbauer-Spektrometer an beiden Landstellen das Mineral Jarosit nachgewiesen, ein Mineral, das sich nur unter Einfluss von Wasser bilden kann.

### SPUREN VON WASSER

Weitere Messungen an einer hellen Gesteinsformation im *Eagle*-Krater zeigten dann, dass hier entgegen den Erwartungen der Forscher keine einfachen Basalte vorlagen, sondern Sedimente, die aus einer Mischung von Schwefelsalzen in hoher Konzentration und Marsstaub bestehen. „Solche Schwefelkonzentrationen von bis zu 9,9 Gewichtsprozenten lassen sich nur durch einen ungewöhnlich hohen Sulfatanteil der Gesteine erklären“, sagt Johannes Brückner. Die Max-Planck-Wissenschaftler halten Kieserit, ein Magnesium-Sulfat, das zum Beispiel in den Salzablagerungen des Zechsteins in Deutschland auftritt, neben anderen

Sulfaten für den wahrscheinlichen Hauptträger des Schwefels. „Möglicherweise steht *Opportunity* auf den Überresten eines eingetrockneten Salzsees“, erklärt der Mainzer Marsexperte. „Es wäre aber auch denkbar, dass die Gesteine von sauren, schwefelreichen hydrothermalen Lösungen umgewandelt wurden.“

Auf der anderen Seite des Mars hatte *Spirit* anfangs Probleme, Spuren von Wasser zu finden. Obwohl ein großes Flusstal in den Gusev-Krater mündet, ist die Landestelle jetzt eine trockene Marswüste: nur rotbrauner Staub und verstreute Gesteinsbrocken. In einem der Steine wurde allerdings eine hohe Konzentration des Elements Brom entdeckt, was auf die Einwirkung von Feuchtigkeit hindeutet – Bromsalze sind in Wasser sehr leicht löslich. Da weitere Anzeichen für Wasser in der Umgebung fehlten, beschloss das NASA-Team, den Rover in Richtung einer mehr als zwei Kilometer entfernten Hügelkette zu steuern.

In den *Columbia Hills* entdeckte *Spirit* dann Steine, die vollkommen anders sind als alle vorher auf dem Mars gefundenen. Einige Steine haben einen hohen Anteil an flüchtigen Elementen wie Schwefel und Chlor. Das lässt darauf schließen, dass einst Asche und schwefelhaltige Gase von einem nahe liegenden Vulkan in den Gusev-Krater herunterregneten, dort in Kontakt mit Wasser kamen und Sedimente bildeten. Heute ragen die *Columbia Hills* etwa 200 Meter über die

Gusev-Ebene auf, doch früher waren sie vielleicht am Grund eines gefüllten Kratersees. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Steine sowie sulfatreicher Staubschichten in einem Graben deuten jedenfalls darauf hin, dass hier ehemals saure, wässrige Lösungen mit dem vorhandenen Material reagiert haben.

Auch die Messinstrumente der Raumsonde *Mars Express*, von der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA im Juni 2003 ins All geschossen, liefern Hinweise auf ehemalige Vorkommen von Wasser. Trotz extremer Weltraumtemperaturen in der Marsumlaufbahn von minus 100 Grad Celsius bis plus 100 Grad Celsius und dem Beschuss durch die energiereiche kosmische Strahlung und den Sonnenwind funktioniert die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof entwickelte *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) an Bord der europäischen Raumsonde tadellos. Es handelt sich hierbei um das erste Kamerasystem an Bord einer Planeten-sonde, das eine Oberfläche gleichzeitig in hoher Auflösung, dreidimensional und in Farbe abbilden kann. Die Software zur Auswertung der digitalen Kameradaten wurde von Mitarbeitern des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau entwickelt.

Nach drei Jahren und fast 4000 Marsumrundungen hat die Stereokamera mittlerweile 45 Millionen Quadratkilometer und damit ein Drittel der Marsoberfläche, die in etwa so groß ist wie die Fläche aller Kontinente auf der Erde zusammengenommen, in einer Auflösung zwischen zehn und zwanzig Metern pro Pixel aufgenommen. Knapp 80 Millionen Quadratkilometer wurden mit einer etwas geringeren Auflösung von weniger als 40 Metern pro Pixel aufgezeichnet: Das entspricht etwa der achtfachen Fläche Europas. Insgesamt wurden 68 Prozent oder fast 100 Millionen Quadratkilometer der Marsoberfläche erfasst (**Abb. C**). Die Bilddaten sollen ab 2007 zu einem globalen 3-D-Bildkartenwerk aufgearbeitet werden und Mars-Wissenschaftlern weltweit den Zugriff auf so genannte digitale Geländemodelle ermöglichen.

Für die Auswertung der enormen Datenmengen (etwa 1,5 Terabyte an komprimierten Rohdaten hat *Mars Express* inzwischen zur Erde übertragen) werden Mars-Wissenschaftler rund um den Globus noch Jahre benötigen. Trotzdem, erste wissenschaftliche Erkenntnisse liegen bereits vor: So

waren die gigantischen Vulkane auf dem Mars vermutlich noch in geologisch jüngster Zeit – vor wenigen Millionen Jahren – mit wahrscheinlich geringen Fördermengen letztmals aktiv. Daher erscheint es auch nicht ausgeschlossen, dass die über 20 Kilometer hohen Marsberge vereinzelt noch heute aus dem Inneren des Roten Planeten reaktiviert werden könnten. In der Nähe des Äquators, wo die Temperaturen auf dem sonst eisig kalten Mars auch über dem Gefrierpunkt liegen können, wurden von Staub bedeckte, relativ junge Gletscher identifiziert.

### Die Marsoberfläche in 3-D

Auch die auffallend gewundenen Täler auf dem Mars, die vor Milliarden von Jahren offensichtlich von Flüssen ausgewaschen wurden und sich durch einen Fließkanal am Boden des Tals als ehemalige Flussläufe verraten, hat das HRSC-Team untersucht. Mithilfe der dreidimensionalen Daten der Stereokamera konnte erstmals die Tiefe eines solchen Flusstals auf dem Mars gemessen werden. Aus der Breite und der Tiefe des heute trocken gefallenen Flussbettes ließ sich dann die mittlere Abflussmenge ableiten. Zur Überraschung der Forscher war sie mit knapp 5.000 Kubikmetern pro Sekunde nur etwa doppelt so groß wie die des Rheins heute. „Angesichts der zum Teil riesigen Ausmaße der Täler hätte man größere Abflussmengen erwarten können“, so einer der DLR-Geologen. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass es vor etwa 3,5 Milliarden Jahren über einen vergleichsweise langen Zeitraum von einigen 100 Millionen Jahren mehrfache, kurzfristige Aktivitätsphasen von Flüssen gab.

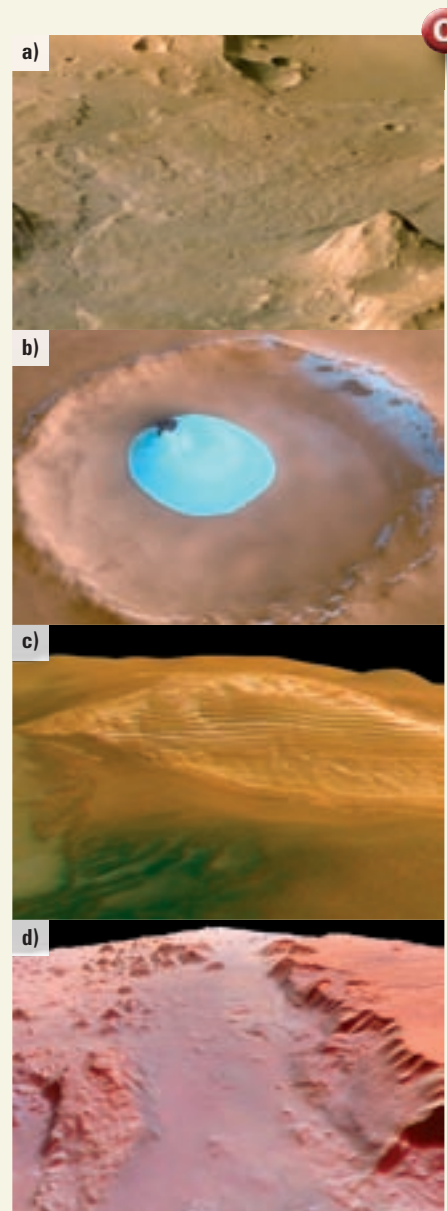
Ein anhaltendes Fließen über diesen langen Zeitraum ist auf Grund der ermittelten Erosionsraten, des Abflusses und des Sedimenttransportes jedoch unwahrscheinlich. Die Forscher gehen davon aus, dass die Flüsse nur während kurzer Zeitspannen Wasser führten, um dann für Millionen von Jahren wieder trocken zu fallen. Dies zeige, dass Wasser auf dem Mars auch in seiner Frühphase nicht anhaltend, sondern nur sporadisch eine Rolle gespielt habe. Allerdings können die Forscher bisher nicht erklären, durch welchen Prozess diese Episoden fließenden Wassers auf dem Mars ausgelöst wurden. Möglicherweise spielte Vulkanismus, der im Untergrund gespeicherte Eismassen abtaute, eine Schlüsselrolle.

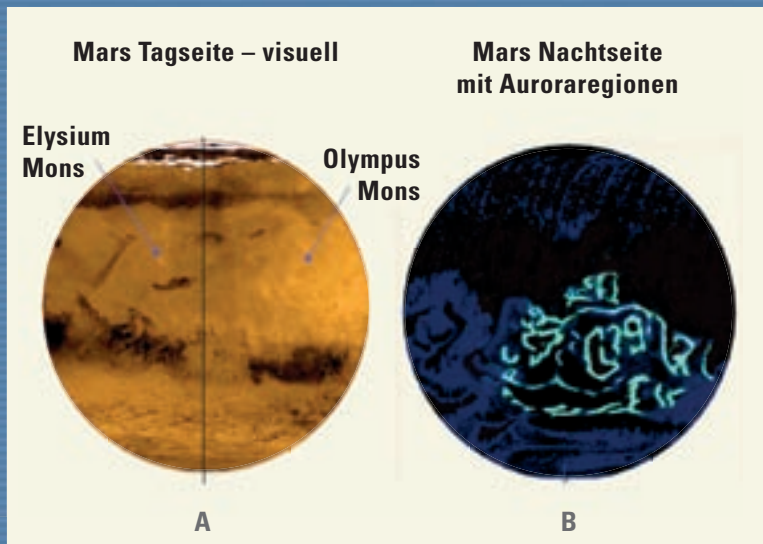
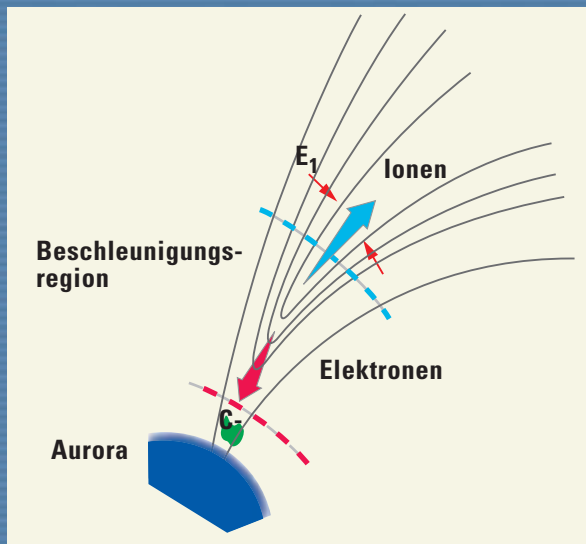
Heute ist die Marsoberfläche knochentrocken und wegen der sehr dünnen Atmosphä-

re auch nicht imstande, flüssiges Wasser zu halten; es verdunstet sofort – nur auf den sehr kalten Marspolen gibt es Wassereis. Eines der größten Rätsel der Planetenforschung lautet daher, wie der Mars seine dichte Atmosphäre verloren hat. Seit einigen Jahren diskutieren die Wissenschaftler, ob der Sonnenwind die Marsatmosphäre im Lauf der vergangenen drei Milliarden Jahre abgetragen hat. Dieses elektrisch geladene Gas (Plasma) besteht hauptsächlich aus Protonen und Elektronen sowie zu einem geringeren



- ▼ a) Ein trocken gefallener Flusslauf, zu erkennen als schmale Rinne, eingebettet in einem größeren Tal in der Hochlandregion Libya Montes.
- b) Krater mit Wassereis.
- c) 2500 Meter hoher Berg im Juventae Chasma. Seine Schichten bestehen zum Teil aus hydratisierten, also wasserhaltigen Sulfaten (Schwefelmineralien).
- d) Eos Chasma, die „Schlucht der Morgenröte“.





© Rickard Lundin / Mats Holmstrom / IRF

▲ Die Illustration zeigt, wie in einem magnetischen Trichter positive Ionen vom Mars weg beschleunigt werden, während Elektronen auf die Atmosphäre des Planeten prallen und dort Aurora-Phänomene verursachen: Das Bild rechts (B) zeigt die Nachtseite des Mars während eines Sonnensturms, wie man sie im sichtbaren Licht durch ein sehr empfindliches Teleskop beobachten würde. Entlang der Krustenfelder über der Südhalbkugel bildet sich Aurora-Leuchten. Über der Tagseite (links – A) verhindert die Ionosphäre des Planeten die Bildung einer Aurora.

→ Teil aus Helium-, Sauerstoff- und anderen Ionen. Mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 400 Kilometern pro Sekunde strömt es von der Sonne ins Weltall. Mit dem Spektrometer ASPERA-3 (*Analyzer for Space Plasmas and Energetic Atoms*) an Bord der Raumsonde *Mars Express* untersuchen die Forscher die Wechselwirkungen zwischen Sonnenwind und Marsatmosphäre.

In einer ersten Arbeit haben die schwedischen Kollegen aus dem Team den Gesamtfluss energetischer Ionen von der Marsoberfläche bestimmt. Danach ist die Abflussmenge an Gasen aus der Atmosphäre geringer als in Modellen vorhergesagt. „Wenn sich diese Resultate unabhängig bestätigen lassen, spricht dies eher für einen anderen Abtragsprozess der Atmosphäre, zum Beispiel durch einen massiven Einschlag“, erklärt Markus Fränz vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau.

Mit ASPERA-3 konnten die Max-Planck-Wissenschaftler auch zeigen, dass positive Ionen (vermutlich Sauerstoff-Ionen) in magnetischen Trichtern vom Mars weg beschleunigt werden, während Elektronen auf die Atmosphäre des Planeten prallen und dort Aurora-Phänomene verursachen (Abb. D). Über seiner Südhalbkugel besitzt der Mars nämlich starke Magnetfelder – offenbar Relikte eines ursprünglichen Magnetfelds in der Planetenkruste –, die eine sehr heterogene Struktur mit lokalen magnetischen Trichtern aufweisen. Geophysiker vermuteten

schon länger, dass an diesen Trichtern – wie an den Polkappen der Erde – Aurora-Phänomene, also Polarlichter, auftreten müssten. Mit dem UV-Spektrometer SPICAM auf *Mars Express* konnten sie die Mars-Aurora nun auch direkt durch ihre UV-Strahlung beobachten.

### EIN STAUBSTURM Zieht AUF

Während sich die Mars-Forscher über die Unmengen von Daten auf ihren Computern noch den Kopf zerbrechen, geht den beiden kleinen Mars-Robotern langsam die Puste aus: In der letzten Juniwoche zog ein Staubsturm westlich der Ebene Meridiani auf. Die Wissenschaftler hoffen, dass *Opportunity* diesen Sturm übersteht. Der Staub verhindert, dass große Teile des Sonnenlichts auf die Planetenoberfläche gelangen. Die Solarzellen, die den Strom für den Betrieb des Rovers erzeugen, beziehen ihre Leistung nur noch aus diffusem Streulicht. Um die Batterien zu schonen, wurden die Fahrten des Rovers vorerst ausgesetzt und die Beobachtungen eingestellt. Mittlerweile hat der Staubsturm auch die Landestelle von *Spirit* erreicht und behindert seine Aktivitäten. Sollte er noch länger anhalten oder gar noch dichter werden, dann könnten die Rover ernstlich in Gefahr geraten. Denn ganz auf Energie können sie nicht verzichten – ihre Elektronik und Akkus würden ungeheizt die kalten Marsnächte nicht überstehen.

Diese unwirtlichen Bedingungen auf dem Roten Planeten haben schon früheren Marsmissionen ein Ende gesetzt: Mit Einzug des

Winters – die Temperaturen sinken dann nachts unter minus 80 Grad Celsius – fielen die Akkus des Rovers *Sojourner*, der im Rahmen der *Pathfinder*-Mission 1997 auf dem Mars abgesetzt worden war, wegen Kälte aus. Allerdings erwachte der Rover tagsüber zum Leben, solange seine Solarpaneele Sonnenlicht erhielten. Nach drei Monaten stellte das Landegerät seinen Betrieb ein, sodass *Sojourner* keine Kommunikation mehr mit der Erde hatte. Wo er sich jetzt befindet, wissen die Wissenschaftler nicht. *Sojourner* war der Testlauf für die beiden Rover *Spirit* und *Opportunity*. Die sind schon im dritten Jahr auf dem Mars unterwegs, viel länger als die Forscher ursprünglich erwartet hatten. Offenbar hat *Sojourner* gute Vorarbeit geleistet.

**Schlagwörter:** Marsatmosphäre, Sonnenwind, Magnetfeld, Polarlichter, Röntgenspektren

**Lesetipp:** Dirk H. Lorenzen, *Mission: Mars, Kosmos*, April 2004; Olivier de Goursac, *Bilder vom Mars*, Knesebeck, Mai 2005

**Links:** [www.dlr.de/mars/desktopdefault.aspx/tabid-284/940\\_read-1400/](http://www.dlr.de/mars/desktopdefault.aspx/tabid-284/940_read-1400/)

[www.mpch-mainz.mpg.de/mer-apxs/](http://www.mpch-mainz.mpg.de/mer-apxs/)

[www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/aktuell.xml](http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/aktuell.xml)

[www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/europa.xml](http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/europa.xml)

## DIE „MAX“-REIHE

auch unter [www.max-wissen.de](http://www.max-wissen.de) – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: