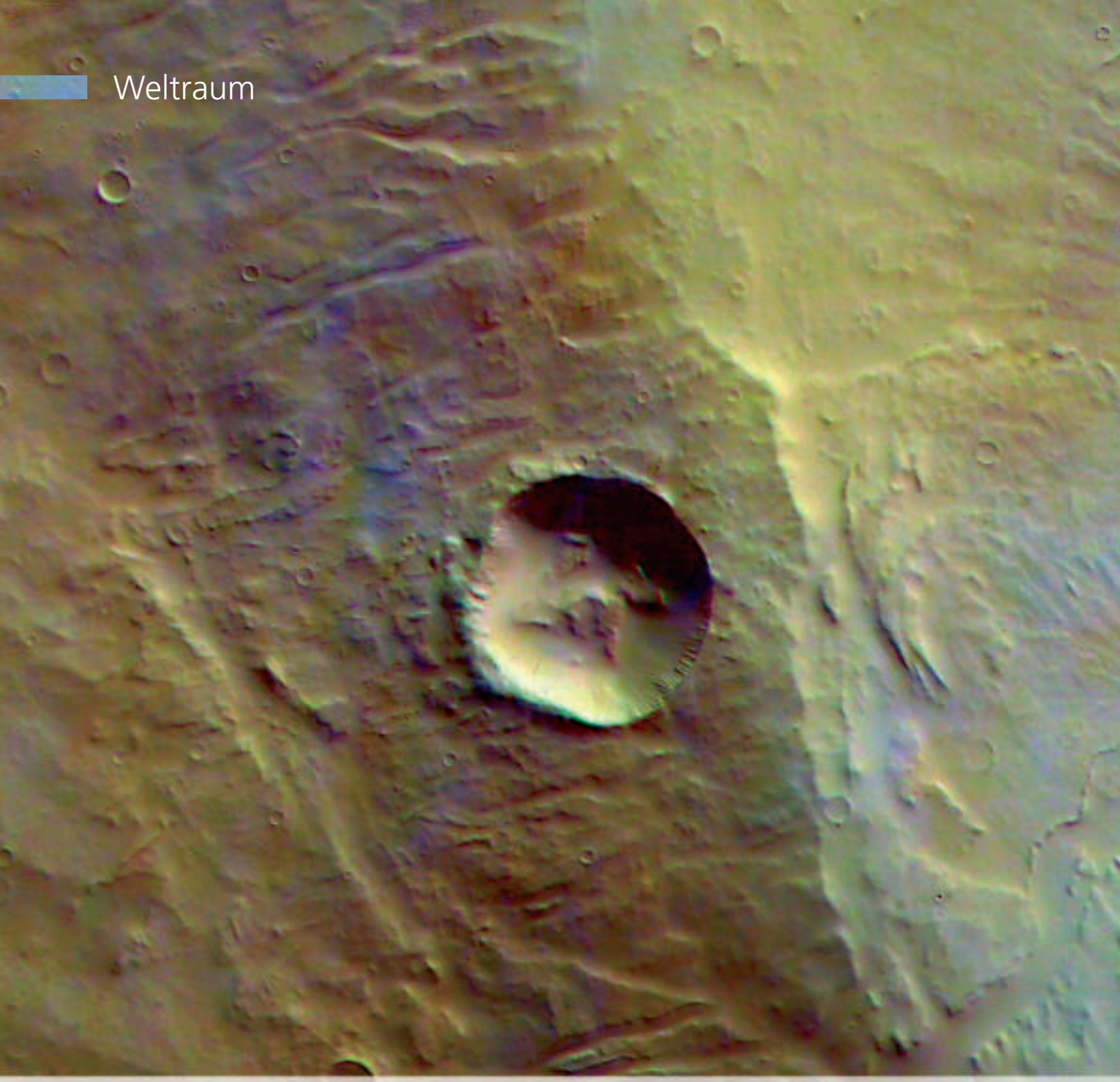
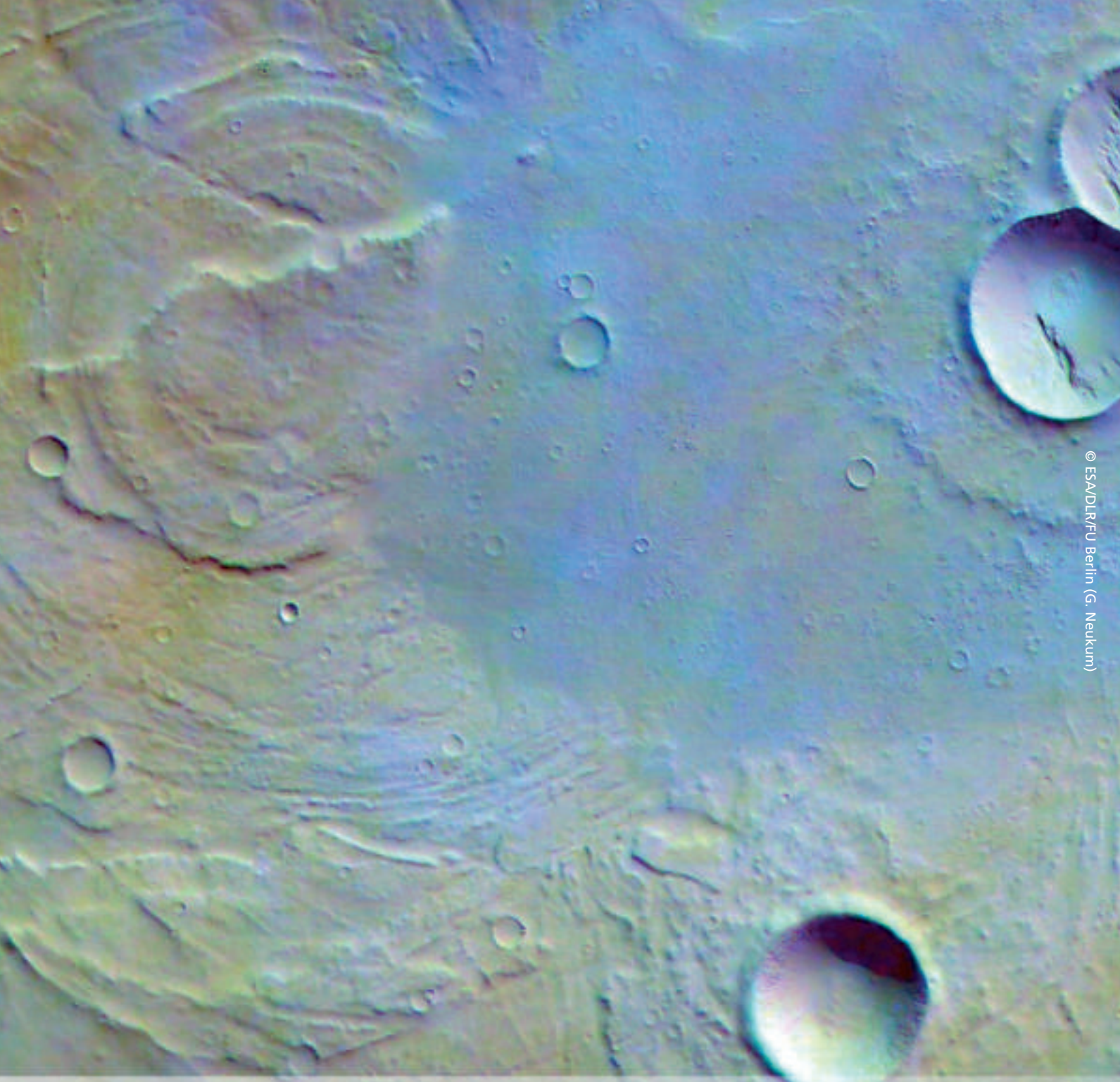


Vom Bit zum Bild

Drei Jahre schon betreibt das DLR die Stereokamera HRSC auf der Raumsonde Mars Express

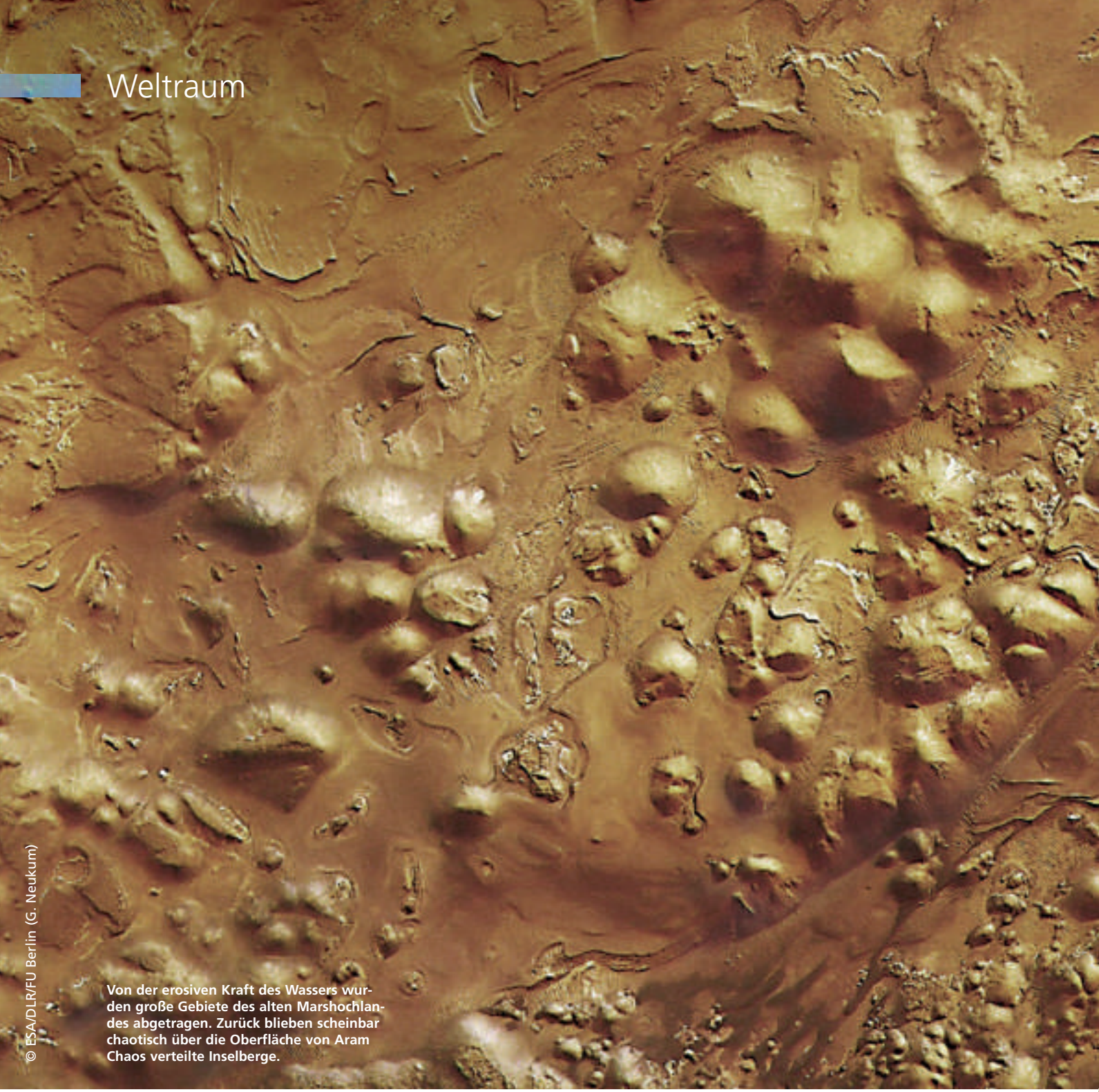


© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Vom HRSC-Experiment-Team unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Jaumann

Seit nunmehr drei Jahren wird in Berlin mit großem Erfolg das bislang umfangreichste deutsche Experiment auf einer Planetenmission durchgeführt: Die erstmalige globale Kartierung des Planeten Mars in hoher Auflösung, in Farbe und in „3D“. Das Aufnahmesystem, das hierfür eingesetzt wird, wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gemeinsam mit Industriepartnern entwickelt und gebaut – die Stereo-Hochleistungskamera HRSC (High Resolution Stereo Camera). Sie befindet sich an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express. Bilddaten von herausragender Qualität werden von der HRSC seit dem 10. Januar 2004 zur Erde gefunkt und an das HRSC-Experiment-Team am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof weitergeleitet. Mit den 3-D-Aufnahmen wird die Erforschung des Mars gegenwärtig auf eine neue Grundlage gestellt.

Aus der über einhundert Kilometer großen Gipfelcaldera (rechte Bildhälfte) des Vulkans Apollinaris Patera ergoss sich vor über dreieinhalb Milliarden Jahren Lava über den Mars. Wasser und tektonische Spannungen prägten anschließend die Oberfläche, deren unterschiedliche Zusammensetzung mit Falschfarben deutlich zum Vorschein kommt.



© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Von der erosiven Kraft des Wassers wurden große Gebiete des alten Marshochlandes abgetragen. Zurück blieben scheinbar chaotisch über die Oberfläche von Aram Chaos verteilte Inselberge.

Mars Express schwenkte am 25. Dezember 2003 in seine Umlaufbahn ein. Mit sieben Experimenten erkundet die Sonde den Mars seit nun fast drei Jahren und etwa 3.800 Orbits. Dabei werden viele unterschiedliche wissenschaftliche Ziele verfolgt, um ein besseres Verständnis von der Entwicklung des Mars zu bekommen. Im Vordergrund steht bei allen aktuellen Marsmissionen die Suche nach den Spuren von Wasser, das in der Frühzeit des Planeten in großen Mengen über die Oberfläche geströmt ist. Wohin das Wasser verschwunden ist, ob in den Untergrund oder in die Atmosphäre, ist eines der großen Rätsel der Marsforschung – nicht zuletzt vor dem Hintergrund der noch viel spannenderen Frage, ob auf dem Mars je Leben entstehen konnte oder sogar noch heute in Nischen existiert. Mit dem HRSC-Experiment können die Spuren, die Wasser und Eis auf der Oberfläche hinterlassen haben, nun besser identifiziert werden.

Nach fast drei Jahren hat die HRSC mehr als die Hälfte des Roten Planeten in hoher Auflösung erfasst – etwa 80 Millionen Quadratkilometer; fast ein Drittel des Mars sind sogar

in einer Bildauflösung von zehn bis zwanzig Metern pro Pixel aufgenommen worden. Unter der Leitung des Principal Investigators Gerhard Neukum, Professor am Lehrstuhl für Geowissenschaften an der Freien Universität Berlin, werten Wissenschaftler aus zehn Nationen (darunter auch sieben DLR-Forscher) die Bilder aus: Hierzu sind die vom HRSC-Experiment-Team des DLR aufbereiteten hochgenauen 3-D-Bilddaten unerlässlich.

EIN EINMALIGES KAMERASYSTEM

Die HRSC ist ein digitales Aufnahmesystem, das in einem einzigen Vorgang gleichzeitig Bilddaten in hoher Auflösung, in Stereo und in vier Farben aufzeichnet. Erstmalig in der Planetenforschung gelingt dies bei einem Gesamtgewicht der Kamera von weniger als 20 Kilogramm: Wegen der hohen Anforderungen an Robustheit und Langzeitstabilität beim Einsatz im Weltraum gilt dies als eine Spitzenleistung der Miniaturisierung.

Von einer „gewöhnlichen" Digitalkamera unterscheidet sich die HRSC markant. So verfügt die Kamera zunächst über zwei Aufnahmesysteme: zum einen über den HRSC-Kopf mit neun lichtempfindlichen „Charge-Coupled Device" (CCD)-Zeilensensoren, die hinter einem Objektiv von 175 Millimetern Brennweite angebracht sind. Und zum anderen über den Super Resolution Channel (SRC) mit einem Spiegelteleskop von knapp einem Meter Brennweite und einem Flächensensor mit 1.024 mal 1.024 CCD-Elementen.

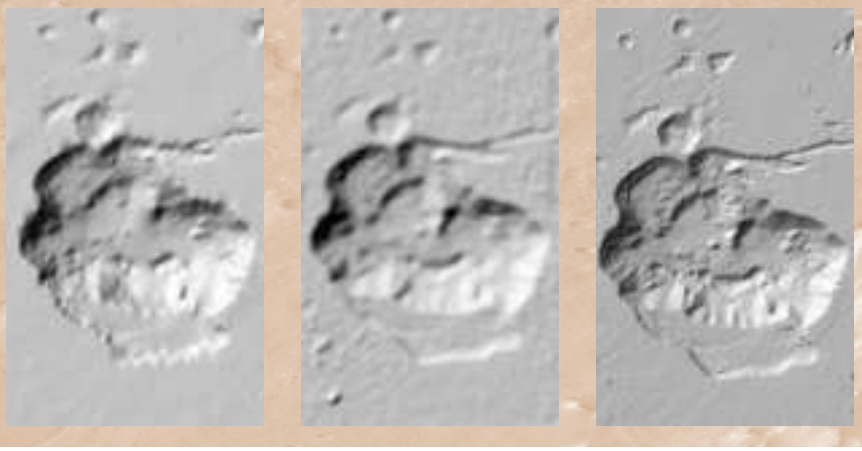
Mit den neun CCD-Zeilen des HRSC-Kopfes wird die Oberfläche wie mit einem Scanner abgetastet. Die Bewegung der Scanzeilen über die Marsoberfläche wird durch den Flug der Raumsonde in ihrem nahezu polaren, elliptischen Orbit bestimmt. Die Zeilensensoren sind quer zur Flugrichtung und parallel zueinander hinter dem Objektiv angebracht. Dadurch nimmt jede der neun Zeilen die Oberfläche – zeitlich kurz versetzt – unter einem anderen Blickwinkel auf. So entstehen insgesamt neun Bildstreifen, die je circa 5.200 Pixel breit sind. Ihre Länge ist durch den Datenspeicher an Bord und die Kapazität der Signalübertragung zur Erde begrenzt. Sie kann bis zu mehrere hunderttausend Pixel betragen.

Fünf der neun CCD-Zeilen werden für Stereo und Photometrie (der Messung der Strahlungsstärke des Lichts) verwendet – je zwei schräg nach vorne und hinten blickende Kanäle, sowie der senkrecht nach unten weisende Nadirkanal. Die vier weiteren Zeilen haben Farbfilter (rot, grün, blau, nahes Infrarot) für multispektrale Untersuchungen, oder vereinfacht, für die Erzeugung von Farbbildern. Beim DLR in Berlin-Adlershof werden mithilfe der genauen Information über Position und Ausrichtung des Raumschiffs aus fünf dieser Bildstreifen dreidimensionale Bilder erzeugt, die dann noch mit den Farbdaten der Marsoberfläche überlagert werden können. Die Auflösung vom Perizentrum, dem marsnächsten Punkt des Orbits in 250 Kilometern Höhe, beträgt für den HRSC-Kopf zehn Meter pro Bildpunkt (Pixel): Damit ließe sich von Berlin aus in Hamburg ein LKW erkennen! Für den SRC beträgt die Auflösung zweieinhalb Meter pro Pixel. Da der Mars Express-Orbit stark elliptisch ist und die Aufnahmehöhe vor und nach dem Perizentrum schnell wieder zunimmt, können Aufnahmen mit hoher Auflösung von bis zu 10 Metern pro Pixel nur während etwa 15 Minuten um das Perizentrum erzielt werden.

Die Kamera korrigiert die Belichtungszeit und die Verstärkung der Lichtsignale während der Aufnahme entsprechend des Orbitprofils. Die HRSC erlaubt einen sehr hohen Datendurchsatz: Jede der neun

HRSC – die High Resolution Stereo Camera mit dem Stereokopf (oben), die den Mars mit neun gleichzeitig aufnehmenden Scannerzeilen in hoher Auflösung, in vier Farben und in „3D" abtastet und zusätzlich Details mit höchster Auflösung im Super Resolution Channel (SRC, unten) erfasst

© DLR/EADS Astrium



© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum); K. Gwinner

Das bisherige digitale Geländemodell (DGM) des Mars, das hauptsächlich auf Messungen einzelner Höhenprofile des amerikanischen Laser-Altimeters MOLA beruht (links), weist technisch bedingte Lücken auf. Durch Stereoverarbeitung von HRSC-Daten wird dagegen eine unmittelbar flächenhafte Oberflächenmodellierung ermöglicht. Dies kann bereits innerhalb einer Verarbeitungszeit von nur einem Tag zu einem flächendeckenden DGM mit verbessertem Detailreichtum führen (Mitte). Durch die vollständige, aber umfangreichere HRSC-Datenverarbeitung sind schließlich noch wesentlich präzisere Ergebnisse erzielbar (rechts).

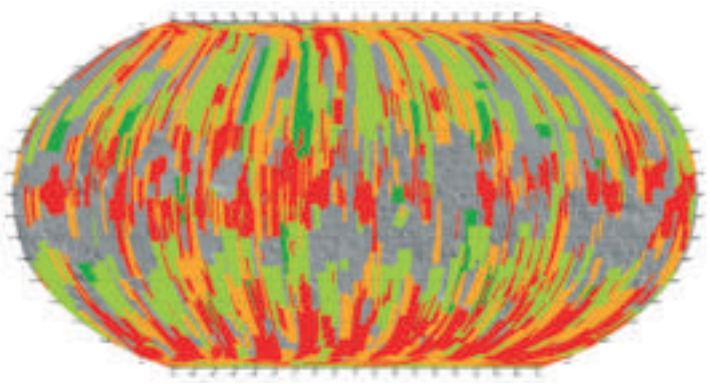
CCD-Zeilen wird bis zu 450 mal pro Sekunde ausgelesen, insgesamt werden so bis zu neun Millionen Pixel pro Sekunde aufbereitet. Dabei wird die Auslesegeschwindigkeit an die Aufnahmehöhe angepasst. Wegen der hohen Datenmenge werden die Bilddaten in Echtzeit komprimiert – zum Zeitpunkt der HRSC-Entwicklung Anfang der 90er-Jahre war dies ein Novum für ein Kamerasystem für den Einsatz im Weltraum. Die Bilder des SRC werden ebenfalls über die HRSC-Signalkette in den Speicher geschrieben.

Die HRSC und die SRC wurden vor dem Start ausgiebig kalibriert, um höchst präzise geometrische und radiometrische Messungen zu ermöglichen. In nunmehr drei Jahren Betrieb im Weltraum blieben die inneren geometrischen und radiometrischen Parameter der Kamera völlig stabil.

Wann, wie lange und über welchen Regionen des Mars die HRSC angeschaltet wird und Bilddaten aufzeichnet, wird vom Experiment-Team nach den Vorgaben der Wissenschaftler individuell festgelegt und bedarf somit einer ausgetüftelten und sekundengenauen Planung für jeden Orbit, in dem die Kamera angeschaltet werden soll. Ganz oben steht die globale Kartierung der Marsoberfläche: Dazu ist es notwendig, Bild an Bild zu großen Mosaiken zusammenzufügen. Mit ihnen können riesige Flächen abgedeckt werden. Außerdem orientiert sich die Aufnahmeplanung an den wissenschaftlichen Zielen des Experiments.

JEDE AUFNAHME IST INDIVIDUELL GEPLANT

Regionen, die bereits von früheren Missionen her als sehr interessant bekannt sind, möchte man natürlich in besonders guter Bildqualität oder – wenn es die Umlaufbahn gestattet – sogar wiederholt aufnehmen. Schließlich gibt es eine Reihe von „Spezialaufnahmen“, die zusätzliche Anforderungen an die Planung stellen, wie zum Beispiel Atmosphärenbeobachtungen oder Aufnahmen der Marsmonde Phobos und Deimos. Um eine bestimmte Zielregion zu treffen, wird zunächst die Flugbahn von Mars Express und die Blickrichtung der Kamera mit einer bestehenden Marskarte verglichen. Wenn die Sonde eine ausgewählte Region überfliegt, wird die Kamera typischerweise für einige Minuten angeschaltet. Eine durchschnittliche Aufnahme erzeugt dabei hundert Megabit komprimierter Daten, die im Speicher der Raumsonde zwischengelagert werden, ehe sie zu den Bodenstationen übertragen werden. Die Zielgebiete liegen oft nicht genau unter der Umlaufbahn, weswegen die Kamera für ihre Beobachtung zur Seite gedreht werden muss. Da die HRSC auf Mars Express nicht über

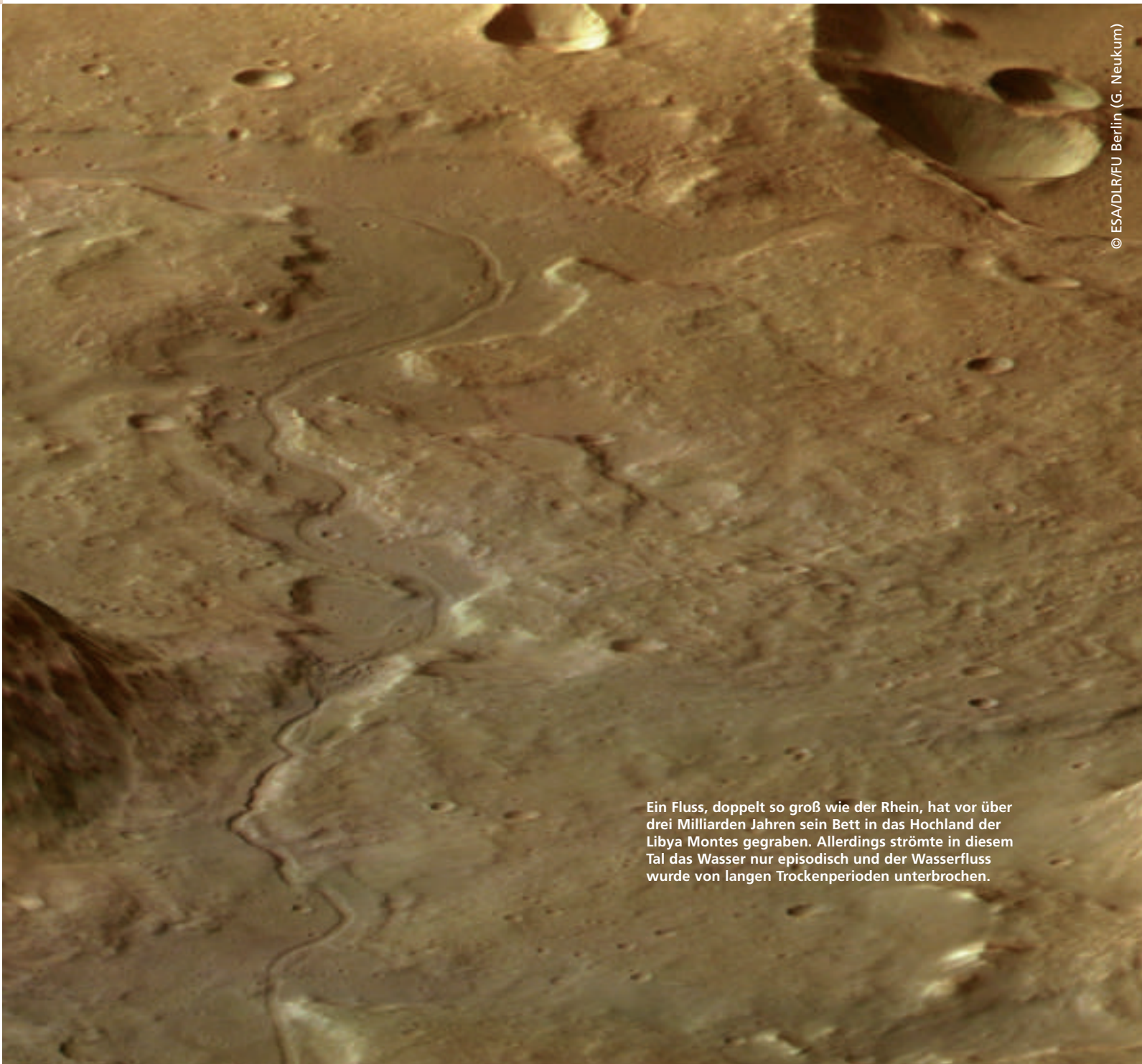


© USGS/DLR (P. Saiger)

In drei Jahren kartierten die Wissenschaftler mit der HRSC zwei Drittel der 145 Millionen Quadratkilometer großen Marsoberfläche; rot zu sehen: die Bildstreifen mit der besten Auflösung von 10 bis 20 Metern pro Bildpunkt

eine schwenkbare Kameraplattform verfügt, sondern fest mit der Sonde verbunden ist, bedeutet dies, dass die gesamte Sonde – in Abstimmung mit den anderen Instrumenten – zur Seite rotiert werden muss. Ein ebenfalls wichtiger Punkt bei der Koordination mit den anderen Instrumenten betrifft die erzeugten Datenmengen. Die Sonde kann innerhalb einer gewissen Zeit nur eine bestimmte Menge an Daten zur Erde übertragen. Diese hängt von der Entfernung zur Erde, den verfügbaren Bodenstationen und anderen Parametern ab.

Um die gewünschten Beobachtungen aller Instrumente aufeinander abzustimmen, werden in wöchentlichen, manchmal auch täglichen Telefonkonferenzen, die vom Project Science Team am ESTEC, dem ESA-Zentrum in Noordwijk (Niederlande), moderiert werden, die einzelnen Anforderungen koordiniert. Drei Monate vor den eigentlichen Aufnahmen werden die Aufnahmeabläufe endgültig festgelegt und nach Überprüfung durch die Missionskontrolle der ESA in Darmstadt zur Raumsonde übertragen. Die HRSC-Aufnahmen selbst laufen dann nach dem einprogrammierten Schema automatisch ab. Am Kontrollzentrum der ESA in Darmstadt, dem ESOC, wird der Mars Express-Datenstrom nach den



© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Ein Fluss, doppelt so groß wie der Rhein, hat vor über drei Milliarden Jahren sein Bett in das Hochland der Libya Montes gegraben. Allerdings strömte in diesem Tal das Wasser nur episodisch und der Wasserfluss wurde von langen Trockenperioden unterbrochen.

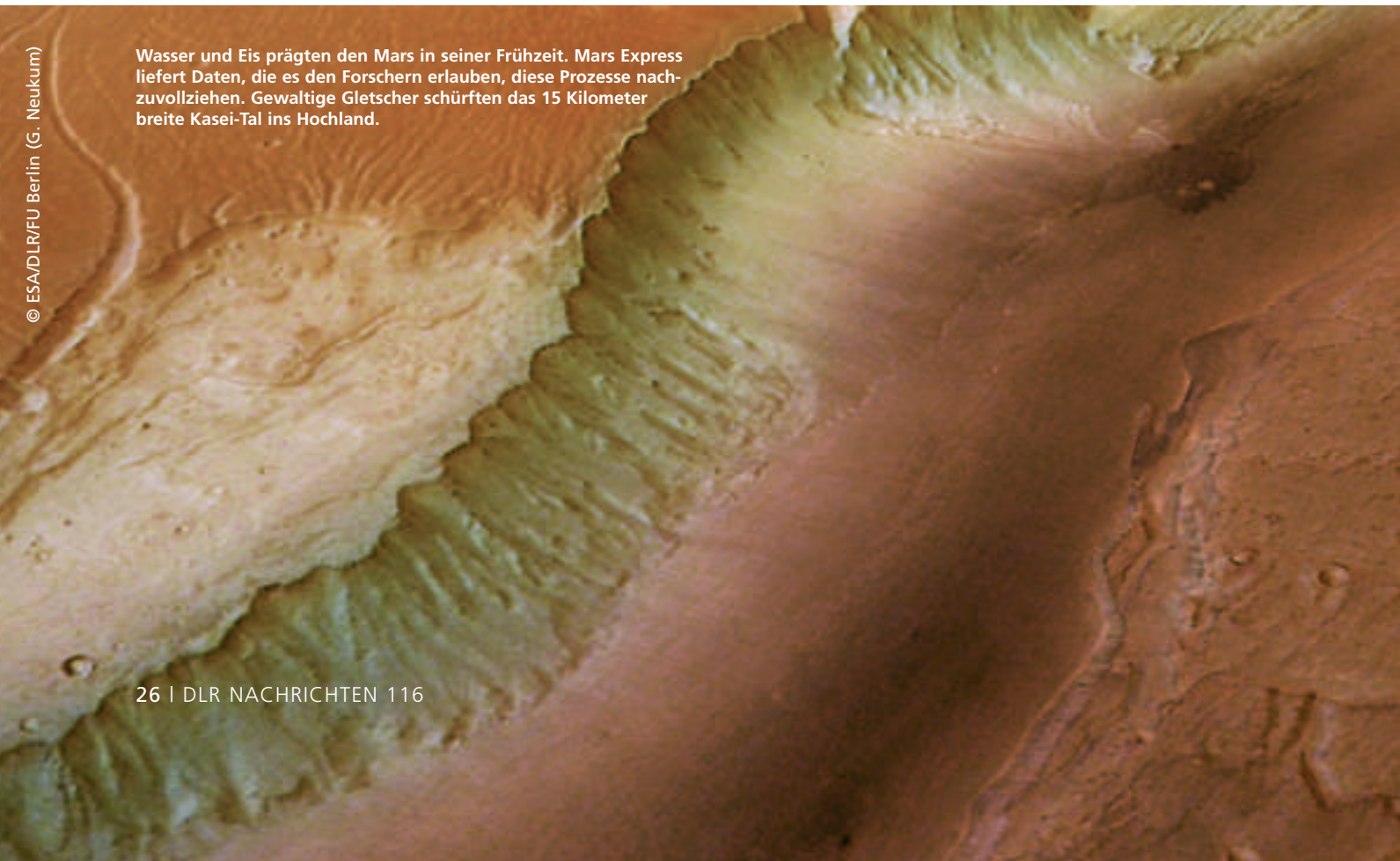
verschiedenen Experimenten sortiert und dann archiviert. In regelmäßigen Abständen werden die HRSC-Daten aus Berlin abgefragt und in einem ersten Schritt in die einzelnen Sensoren aufgeteilt sowie dekomprimiert. Gleichzeitig werden dabei die Bilddaten mit wichtigen Zusatzinformationen wie Aufnahmezeitpunkt, Sensortemperaturen und Belichtungszeit verknüpft, die parallel von der Sonde übertragen wurden.

Im Ergebnis liegen dann erstmals Bilddaten zum Betrachten vor. Für eine wissenschaftliche Auswertung sind diese Bilder aber noch nicht geeignet, es müssen vorher noch das unterschiedliche radiometrische Verhalten der einzelnen Kamerapixel (Empfindlichkeit, Dunkelstrom) und die unterschiedlichen Aufnahmebedingungen der einzelnen Zeilen (Belichtungszeit, Verstärkungsfaktor) korrigiert werden. Das Ergebnis dieses Schrittes sind nun nicht mehr Daten mit einer Farbtiefe von 8 Bit (Beschreibung eines Grauwertes in 256 Abstufungen), wie sie nach der Dekompression vorlagen, sondern 16-Bit-Daten. Das bedeutet, dass sich die ohnehin schon große Datenmenge noch einmal verdoppelt hat.

AUS DATEN WERDEN BILDER

Zum Abschluss der systematischen Verarbeitung der Daten werden die Bilder mit den vom ESOC bereitgestellten Bahn- und Lagedaten der Raumsonde verknüpft und dann in ein maßstabsgetreues Bild umprojiziert. Als Referenzkörper dient dabei das globale amerikanische Mars-Höhenmodell auf Grundlage von Lasermesspunkten der NASA-Sonde Global Surveyor. Dieses Verfahren liefert sehr schnell Ergebnisse, die für viele Aufgabenstellungen nutzbar sind. Sämtliche systematisch erzeugten Datenprodukte werden zusammen mit einer Vielzahl von Begleitdaten in einer Datenbank archiviert. Das HRSC-Wissenschaftsteam hat über eine Internetschnittstelle an der Technischen Universität Wien Zugriff darauf. Der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft werden die Daten nach einer Sperrfrist von sechs Monaten über das „Planetary Science Archive“ (PSA) der ESA bzw. das „Planetary Data System“ (PDS) der NASA zugänglich gemacht.

Die Fähigkeit der HRSC, kontinuierlich für große Flächen hohe Auflösung, Stereobilddaten und gleichzeitig auch Farbinformation bereitzustellen, unterscheidet sie maßgeblich von früheren Instrumenten in der Planetenfernerkundung. Diese einzigartige Kombination verschiedenartiger Datensätze wird mithilfe einer am DLR-Institut für Planetenforschung speziell für diesen Kameratyp entwickelten Software verarbeitet und ausgewertet. Im Gegensatz



Wasser und Eis prägten den Mars in seiner Frühzeit. Mars Express liefert Daten, die es den Forschern erlauben, diese Prozesse nachzuvollziehen. Gewaltige Gletscher schürften das 15 Kilometer breite Kasei-Tal ins Hochland.

© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

MARS IN DER DRITTEN DIMENSION

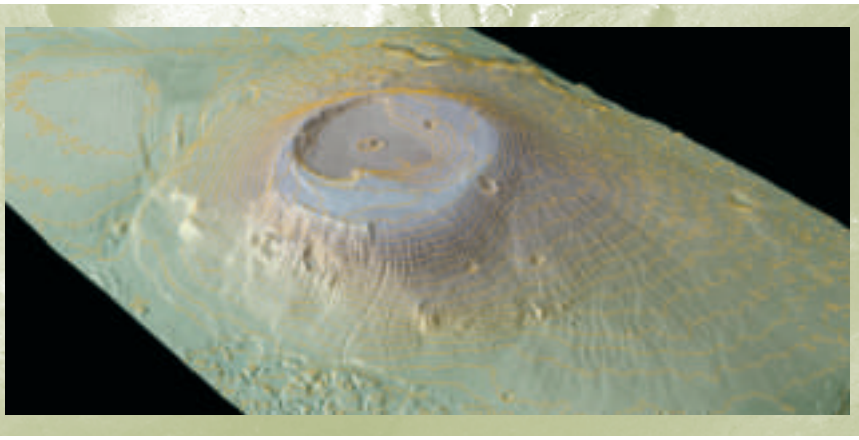
zur vorangehenden systematischen Verarbeitung ist das Ziel der photogrammetrischen Auswertung zunächst die detaillierte 3-D-Modellierung der Marsoberfläche aus den HRSC-Stereobilddaten. Diese erfolgt in zwei verschiedenen Prozessketten. Eine erste vorläufige 3-D-Modellierung geschieht vollautomatisch und unmittelbar nach der vorangehenden systematischen Verarbeitung. Dadurch stehen zur weiteren geologischen Auswertung schon wenige Stunden nach Empfang der Daten eines Orbits digitale HRSC-Oberflächenmodelle in einem 200-Meter-Raster bereit, deren Detailreichtum die bisherige Kenntnis zur Form der Marsoberfläche bereits erheblich erweitert. Der Fortschritt gegenüber der Vor-Mars-Express-Ära, in der Laser-Höhenmessungen des MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)-Experiments auf der NASA-Sonde Global Surveyor als unerlässliche Referenz galten, wird durch eine zweite, verfeinerte 3-D-Prozessierung der HRSC-Stereodaten noch erheblich gesteigert. Durch Optimierung aller Eingangsdaten – z. B. der Einflüsse durch Datenkompression oder durch die Verbesserung der Bahn- und Lagedaten der Raumsonde – sowie durch eine Verdichtung des Messrasters kann so das ganze Potenzial der HRSC ausgenutzt und es können digitale Oberflächenmodelle mit einer Rasterweite von bis zu 50 Metern abgeleitet werden.

Die Qualität der Endprodukte wird letztendlich nur durch die geometrische Auflösung der Bilddaten, die Qualität der Bahn- bzw. Lagedaten, sowie durch die Bedingungen während der Datenaufzeichnung (Beleuchtung, Atmosphäreneinflüsse, etc.) begrenzt. Präzise 3-D-Oberflächenmodelle sind auch eine Grundvoraussetzung für die Erstellung von farbigen Orthobilddaten (Aufsichten), die die Produktpalette vervollständigen. Dabei handelt es sich um Bildprodukte, die lagerichtig die Oberfläche darstellen, ohne dabei durch die Form der Oberfläche verzerrt zu werden. Die Auflösung der Orthobilder beträgt bis zu 12,5 Meter pro Pixel. Bisher liegen bereits fast 1,5 Terabyte an vorläufigen Level-4-Produkten sowie zahlreiche hochauf gelöste Oberflächenmodelle vor. Je nach Bedarf werden abschließend einzelne Oberflächenmodelle und Orthobildstreifen zu regionalen oder globalen Mosaiken zusammengefügt.

Aus der Kombination von 3-D-Modellen und Orthobilddaten werden sowohl dreidimensionale perspektivische Ansichten, als auch animierte 3-D-Überflüge mit beliebiger Blickrichtung erzeugt. Diese verbessern einerseits geologische Analysen, stellen aber auch immer wieder ein medienwirksames, weil spektakuläres Mittel zur Präsentation wissenschaftlicher Forschung dar.

Ziel der 3-D-photogrammetrischen Verarbeitung ist es letztlich, am Ende der Mission die gesamte Marsoberfläche in hoher Auflösung dreidimensional und in Farbe abzubilden – eine bisher einmalige Herausforderung in der Erforschung eines Planeten, der sich das DLR-Institut für Planetenforschung im Rahmen des HRSC-Experiments auf Mars Express gestellt hat. Auf Grund ihres großen Erfolges wurde die Mission von der ESA bereits einmal, bis Ende 2007, verlängert, sie könnte aber aus technischer Sicht problemlos weitere zwei Jahre exzellente Forschungsergebnisse von der HRSC und den anderen sechs Experimenten liefern.

Autoren:
Planung, Bau und Betrieb der Stereokamera HRSC für Mars Express, sowie das Erstellen der wissenschaftlich nutzbaren Bilddaten sind das Ergebnis einer seit mehr als einem Jahrzehnt funktionierenden Teamarbeit im HRSC-Experiment-Team am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof unter Leitung von Prof. Dr. Ralf Jaumann.



Perspektivische Ansicht des Vulkans Apollinaris Patera mit Höhenlinien: Die Fähigkeit, den Mars dreidimensional abzubilden, ist die große Stärke der HRSC. Die Stereo-Bilddaten bilden die Grundlage für die globale topographische Vermessung, woraus die Höheninformation für jeden Punkt auf dem Mars hervorgeht.

© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)/PSaiger