

Wasser auf dem Mars: alles Schnee von gestern?

Die europäische Sonde Mars Express hat erstmals direkt Wassereis auf der Marsoberfläche nachgewiesen.

„Wasser auf dem Mars entdeckt“, titelte die Süddeutsche Zeitung am 24. Januar 2004. Tags zuvor waren auf einer großen Pressekonferenz am ESOC (European Space Operations Centre) in Darmstadt die ersten Ergebnisse der europäischen Weltraummission Mars Express vorgestellt worden. In den Daten fast aller Instrumente waren Hinweise auf Wasser gefunden worden. Das Thema ist nun in aller Munde, und es könnte beinahe der Eindruck entstehen, als seien dies die ersten Indizien überhaupt. Dabei waren schon vor mehr als vierzig Jahren Spuren von Wasser in der Marsatmosphäre gefunden worden. Seither und verstärkt in den letzten Jahren wurden zahllose Arbeiten zur Rolle von Wasser auf dem Mars veröffentlicht. Also alles ein alter Hut? Keineswegs. Der Jubel in Darmstadt war durchaus berechtigt, denn tatsächlich wurden erstmals Wassermoleküle an der Oberfläche direkt nachgewiesen – ein echtes Novum. Es lohnt sich daher, angesichts der zahlreichen Meldungen die verschiedenen indirekten und direkten Methoden vorzustellen, mit denen Wasser auf dem Mars detektiert werden kann (Tab.).

Satellitenbilder können einen indirekten Hinweis auf die Existenz von Wasser liefern. Zahlreiche Oberflächenformen auf dem Mars lassen sich am ehesten mit fließendem Wasser erklären. Die Sonde Mariner 9 entdeckte bereits 1971 Erosionsformen, die an terrestri-

sche Entwässerungsnetze erinnern [1]. Die Aufnahmen sorgten für eine Sensation, denn bis zu dieser Zeit galt der Mars als toter, mondähnlicher Planet. Geomorphologische Beobachtungen, die mit Hilfe der Analogie zu irdischen Formen interpretiert werden, sind insofern deutliche, aber indirekte Hinweise auf Wasser oder Eis. Vor vier Jahren zeigten hochauflösende Bilder von Global Surveyor Hangrinnen, die geologisch gesehen sehr jung und höchstwahrscheinlich durch

Temperaturmessungen bestätigten diese Vermutung, denn die Böden der Senken sowie die Randbereiche der Eiskappe sind einerseits zu warm, um mit gefrorenem CO₂ erklärt werden zu können, andererseits aber zu kalt für „normale“ Marsböden. Die einzige Alternative ist Wassereis [3].

Auf Mars Odyssey befindet sich außerdem das GRS (Gamma Ray Spectrometer), ein Instrument zur Messung von Neutronen und Gammastrahlung, die durch das

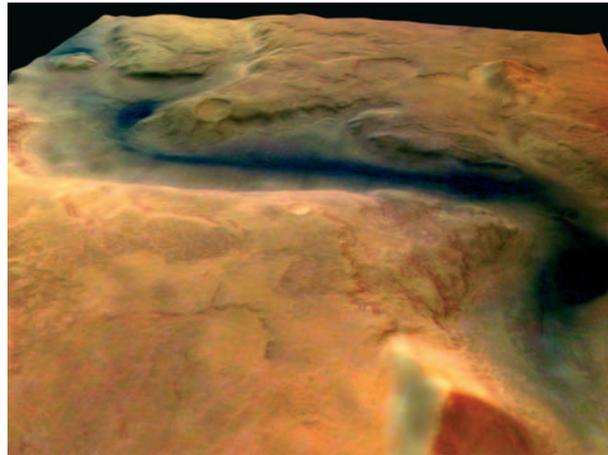


Abb. 1: Diese Aufnahme der High Resolution Stereo Camera (HRSC) zeigt das Tal Reull Vallis, das durch fließendes Wasser geformt wurde (Quelle: ESA/DLR/FU Berlin/G. Neukum)

fließendes Wasser entstanden sind. Die Kartierung wasserbezogener Oberflächenformen ist ein wissenschaftliches Hauptziel der hochauflösenden Stereokamera HRSC (High Resolution Stereo Camera) auf Mars Express, die bereits erste Aufnahmen in exzellenter Qualität geliefert hat (Abb. 1).

Auch mit Temperaturmessungen lässt sich Wasser nur indirekt nachweisen. Die Daten der Infrarotspektrometer TES (Thermal Emission Spectrometer) auf Global Surveyor und THEMIS (Thermal Emission Imaging System) auf Mars Odyssey lieferten erstmals klare Hinweise auf Wassereis in der Südpolkappe. Gemessen wurden dabei die Temperatur der Randbereiche der Polkappe sowie die Böden von topographischen Senken. Diese Senken, die alle etwa 10 m tief sind, waren zuvor in hochauflösenden Bildern entdeckt worden. Zeitlich gestaffelte Aufnahmesequenzen zeigen eine Verbreiterung der Senken um etwa ein bis drei Meter pro Jahr, aber keine Vertiefung. Computermodelle deuten darauf hin, dass es sich bei den Senken um „Löcher“ in einer 10 m mächtigen, langsam zurückweichenden Eisschicht aus CO₂ handeln könnte, unter der Wassereis zum Vorschein kommt [2]. Die

Bombardement des Marsbodens mit kosmischer Strahlung freigesetzt werden. Diese besteht vorwiegend aus hochenergetischen Protonen, die wegen des fehlenden Magnetfeldes und der dünnen Atmosphäre nahezu ungehindert in die Marsoberfläche eindringen. Dabei werden Neutronen erzeugt, die mit den Atomkernen ihrer Umgebung kollidieren. Die angeregten Atomkerne emittieren Gammastrahlung, deren Intensität und Wellenlänge charakteristisch für bestimmte Elemente ist. Wasserstoff weist eine prominente Gammastrahlenemission bei 2,223 MeV auf. Die Neutronen selbst werden bei den Kollisionen umso stärker abgebremst, je kleiner die Atomkerne sind – am stärksten ist der Effekt bei Wasserstoff. Insofern ist über den Regionen mit relativ viel Wasser im oberflächennahen Bereich der Neutronenfluss in den Weltraum „verlangsamt“. GRS kann bis in Tiefen von etwa 1 m messen.

Da mit dieser Methode keine Moleküle, sondern nur Elemente nachgewiesen werden, muss über die Existenz von Wasserstoff (H) auf Wasser (H₂O) geschlossen werden. Dennoch liefert die globale Verteilung der gemessenen Neutronenstrahlung Anhaltspunkte, wo und in welcher Tiefe Wasserstoff

Nachweismethoden von Wasser auf dem Mars

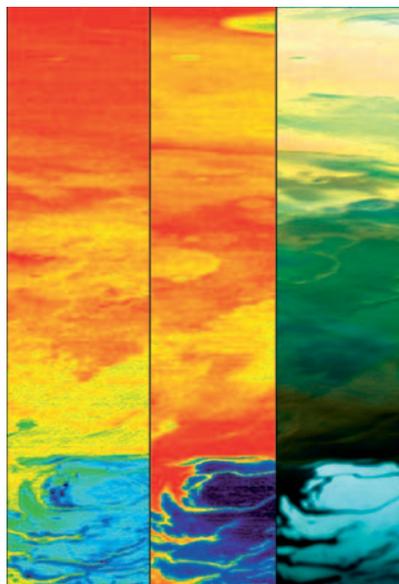
| Sonde | Jahr | Instrument | Methode |
|-----------------|------|--------------------------------------|------------------------------|
| (Erde) | 1963 | Teleskop | Spektralanalyse (direkt) |
| Mariner 9 | 1971 | Kamera | Bilder (indirekt) |
| Viking Orbiter | 1976 | Spektrometer | Spektralanalyse (direkt) |
| Viking Lander | 1976 | Gas-Chromatograph/Massenspektrometer | Erhitzung (direkt) |
| Global Surveyor | 2003 | Infrarotspektrometer | Temperaturdaten (indirekt) |
| Mars Odyssey | 2003 | Infrarotspektrometer | Temperaturdaten (indirekt) |
| Mars Express | 2004 | Spektrometer | Spektralanalyse (direkt) |
| Mars Express | 2004 | Radar (ground penetrating radar) | Reflexionsmessung (indirekt) |

und damit vermutlich Wasser anzutreffen ist. Obwohl alle Angaben über absolute Wassermengen modellabhängig sind, können so in erster Näherung Karten der Wassermenge im Boden erstellt werden [4, 5].

Direkte Nachweismethoden durch Fernerkundungstechniken untersuchen hauptsächlich die spektralen Eigenschaften von Marsatmosphäre und -oberfläche. Bereits 1963 ließen sich in erdgestützten Teleskopaufnahmen erstmals zweifelsfrei die spektralen Signaturen von Wasser in der Marsatmosphäre nachweisen [6]. Dieselben Daten erbrachten allerdings auch den Nachweis eines sehr niedrigen Partialdruckes von CO_2 von nur wenigen Millibar. Da zudem etwa gleichzeitig nach langer Unsicherheit CO_2 als Hauptbestandteil der Atmosphäre nachgewiesen wurde, war klar, dass der Gesamtdruck der Atmosphäre zu gering ist, um die Existenz flüssigen Wassers an der Oberfläche zu ermöglichen. Unter den jetzt herrschenden Bedingungen ist Wasser im Allgemeinen nur in gasförmigem oder festem Zustand stabil.

Seit den Viking-Missionen Mitte der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts ist bekannt, dass die Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre im nördlichen Sommer über der Nordpolkappe signifikant ansteigt. Gemessen wurde der Wassergehalt von MAWD (Mars Atmospheric Water Detector), einem Infrarotspektrometer, das die Absorp-

tionsbande von Wasser bei $1,38 \mu\text{m}$ messen konnte. Die Beobachtung wurde als Folge der Sublimation von Wassereis unter erhöhten Sommertemperaturen interpretiert und gilt als erster Nachweis von Wassereis am Nordpol [7, 8]. Im Winter ist der Nordpol von einer saisonalen CO_2 -Eisschicht überzogen, die das darunterliegende Wasser vor der Sublimation schützt.



turen von Wassereis. Die Forscher können ausschließen, dass es sich um Eis in der Atmosphäre handelt, denn dabei wären die Absorptionsbanden nicht so tief. Wiederholte Beobachtungen bestätigten die räumliche Verteilung und ließen keinerlei Wassereiswolken erkennen. (Abb. 2).

Mars Express besitzt zusätzlich ein Gerät, um Wasser indirekt im

Abb. 2: Diese Aufnahmen des Spektrometers Omega zeigen jeweils einen Blick auf die Südpolregion des Mars mit unterschiedlichen Informationsgehalten. Das rechte Teilbild ist ein konventionelles Farbbild im sichtbaren Wellenlängenbereich. Das linke und das mittlere Teilbild zeigen farbkodiert die kombinierte Intensität von mehreren Absorptionsbanden bei unterschiedlichen Wellenlängen (blau = hohe, rot = geringe Absorption): Links ist Wassereis dargestellt, in der Mitte Trockeneis aus CO_2 . In den blauen Regionen kommt jeweils viel Eis vor. Die quantitative Auswertung der Daten ist noch nicht abgeschlossen. (Quelle: ESA)

Der erste direkte Nachweis von Wassermolekülen an der Marsoberfläche gelang jetzt einem französischen Team mit dem abbildenden Spektrometer Omega auf Mars Express, das im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich arbeitet. Ein Spektrum der Südpolregion zeigt eindeutige spektrale Signa-

Untergrund nachweisen zu können. Das den Untergrund durchdringende Radar MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding) wird in einem Frequenzbereich von 1,3–5,5 MHz mit einer 40 m langen Antenne den Mars abtasten. Man hofft, durch die Reflexion der Radarstrahlen be-

stimmte Grenzflächen, etwa einen Grundwasserspiegel, bis in eine Tiefe von 5 km erkennen zu können.

Die Marsrover „Spirit“ und „Opportunity“ haben Instrumente an Bord, mit denen sich Wasser indirekt erkennen ließe. Der Spektrometer Mini-TES arbeitet ähnlich wie TES auf Global Surveyor und untersucht die spektralen Signaturen von Böden und Gesteinen. Die NASA glaubt, damit eine grobkörnige Varietät des Minerals Hämatit in der Nähe der Landestelle von Opportunity entdeckt zu haben, die vorwiegend im Zusammenhang mit hydrothermalen Prozessen entsteht. Diese Meldung wird aber von vielen Forschern mit Skepsis gesehen. Der direkte Nachweis in situ gelang aber bereits 1976 den Viking Landern. Durch Erhitzung von Bodenproben konnten Wassermoleküle im Boden freigesetzt werden [9]. Derzeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an einem Pilotprojekt gearbeitet, in dem quantitative elektrische und chemische Messmethoden für Instrumente auf Landegeräten entwickelt werden. Neben flüssigem Wasser und Eis im Untergrund soll nach extrem dünnen Schichten (Monolayern) von nicht gefrorenem Wasser an Mineralpartikeln gesucht werden. Dieses so genannte Adsorbatwasser hat auch bei Temperaturen weit unter 0°C, wie sie an und in der Marsoberfläche herrschen, flüssigkeitsartige Eigenschaften. Das weiß man von Untersuchungen im irdischen Permafrost, wo es bis zu -40°C flüssig bleibt. Also müssten bei der Präsenz von Adsorbatwasser auf dem Mars dort auch chemische Prozesse ablaufen können, die ihre Energie z. B. aus der UV-Strahlung der Sonne beziehen könnten. Die ersten diesbezüglichen Experimente im DLR bestätigen diese Annahme.

Dass Wassereis auf der Marsoberfläche existiert, kann nun nicht mehr bezweifelt werden. Ungeklärt ist allerdings nach wie vor, wann und wie viel Wasser in der Vergangenheit vorhanden war und wo der Großteil davon verblieben ist.

ERNST HAUBER

- [1] D. J. Milton, J. Geophys. Res. **78**, 4037 (1973)
- [2] S. Byrne und A. P. Ingersoll, Science **299**, 1051 (2003)
- [3] T. N. Titus, H. H. Kieffer und P. R. Christensen, Science **299**, 1048 (2003)
- [4] I. Mitrofanov et al., Science **297**, 78 (2002)

- [5] W. V. Boynton et al., Science **297**, 81 (2002)
- [6] H. Spinrad, G. Münch und L. D. Kaplan, Astrophys. J. **137**, 1319 (1963)
- [7] H. H. Kieffer et al., Science **194**, 1341 (1976)
- [8] C. B. Farmer, D. W. Davies und D. D. LaPorte, Science **194**, 1339 (1976)
- [9] K. Biemann et al., J. Geophys. Res. **82**, 4641 (1977)

Super Festkörper beobachtet?

Ultrakaltes festes Helium zeigt Eigenschaften einer Supraflüssigkeit

Die Aufregung unter Festkörper-Physikern war weltweit groß, als kürzlich in *Nature* berichtet wurde, dass in den USA wahrscheinlich der *Supersolid* entdeckt worden sei [1]. *Supersolid*? Ist das womöglich ein superhartes Material, mit dem man bessere Panzer bauen kann? Nein. Das Attribut *Super* ist dem Wort *Superfluid* (oder Supraflüssigkeit) entlehnt – so bezeichnet man Helium unterhalb etwa 2 K, das leichtfüßig durch kleinste Poren fließt und einen Massenstrom im Kreis ohne Energiezufuhr aufrecht erhalten kann. *Super* bedeutet hier also „besonders flüssig, reibungsfrei beweglich“. Ein solches Verhalten ist eng mit der Bose-Einstein-Kondensation verwandt, also mit der massenhaften Besetzung eines einzigen (Einteilchen-) Zustandes: Wenn sich ausreichend viele Helium-Atome im gleichen Impulszustand befinden,

kann wegen des Bose-Zusammenhalts kein einzelnes Teilchen mehr gebremst werden – etwa wie Soldaten, die in Kolonnen marschieren.

Das Phänomen supraflüssiger Elektronen ist in Metallen als Supraleitung bekannt. Viele *Supergase*, d. h. Gase, die Bose-Kondensation aufweisen, sind in letzter Zeit entdeckt und untersucht worden – einige Pionier-Arbeiten wurden mit dem Nobelpreis 2001 ausgezeichnet. (Das Nobel-Komitee liebt offenbar *Super-Phänomene* und hat in den vergangenen acht Jahren neun auf diesem Gebiet tätige Nobel-Laureaten gekürt.) Ein *Supersolid* hat bislang noch gefehlt – dabei erscheint es durchaus klärungsbedürftig, wie ein Festkörper *superfluid* sein kann.

Penrose und Onsager stellten 1956 fest, dass Bose-Kondensation nicht in einem idealen Kristall vorkommen kann [2]. Das ist nachvollziehbar, denn sie nahmen an, dass die Atome lokalisiert an ihren Gitterplätzen sitzen. Also sind sie unterscheidbar, klassisch und können sich gar nicht an der quantenmechanischen Bose-Kondensation beteiligen. In einem realen Kristall gibt es jedoch Leerstellen und Zwischengitteratome. Diese Massendefekte können durch das Gitter wandern, was kollektiv eine Defektdiffusion darstellt. Da die zugehörige Mobilität der Atome einen (kleinen) Überlapp der Wellenfunktionen bedingt, ist Bose-Kondensation wieder möglich [3]. Leggett schätzte den superflüssigen Anteil der Teilchen im festen Helium über den

KURZGEFASST...

■ Elemente 113 und 115 entdeckt

Am Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna, Russland, ist es gelungen, vier Kerne des bislang unbekanntes Elements 115 zu erzeugen. Dazu wurde ein Target aus Americiumdioxid (AmO_2), in dem das Isotop ^{243}Am auf 99,9 % angereichert war, mit einem Strahl aus ^{48}Ca -Ionen beschossen. Bei einer Projektilenergie von 248 MeV hat Yuri Oganessian gemeinsam mit russischen und amerikanischen Kollegen drei Zerfallsketten des Isotops $^{288}\text{115}$ beobachtet, bei einer Energie von 253 MeV eine Kette des Isotops $^{287}\text{115}$. In einer Folge von fünf α -Zerfällen sind diese Isotope dabei zunächst in die Isotope $^{284}\text{113}$ bzw. $^{283}\text{113}$ des bislang ebenfalls unbekanntes Elements 113 zerfallen. (Yu. Ts. Oganessian et al., erscheint in Phys. Rev. C)

■ Neue Physik am Myon?

Im Rahmen der relativistischen Dirac-Gleichung hat der g -Faktor des Myons, das

Verhältnis zwischen magnetischem Moment und Spin, exakt den Wert 2, d. h. $g-2 = 0$. Abweichungen von diesem Wert erklärt das Standardmodell der Teilchenphysik damit, dass das Myon aufgrund der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung virtuelle Teilchen emittiert und absorbiert. Die $g-2$ -Kollaboration am Brookhaven National Laboratory, der auch deutsche Physiker angehören, hat nun neue Ergebnisse an negativen Myonen bekannt gegeben, die gemeinsam mit älteren Ergebnissen an positiven Myonen eine Abweichung zwischen Experiment und Theorie von 2,8 Standardabweichungen ergeben. Sollte sich diese Diskrepanz bestätigen, könnte dies ein erster Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells, z. B. die Existenz von supersymmetrischen Teilchen, sein.

(G. W. Bennett et al., arxiv.org/hep-ex/0401008)