

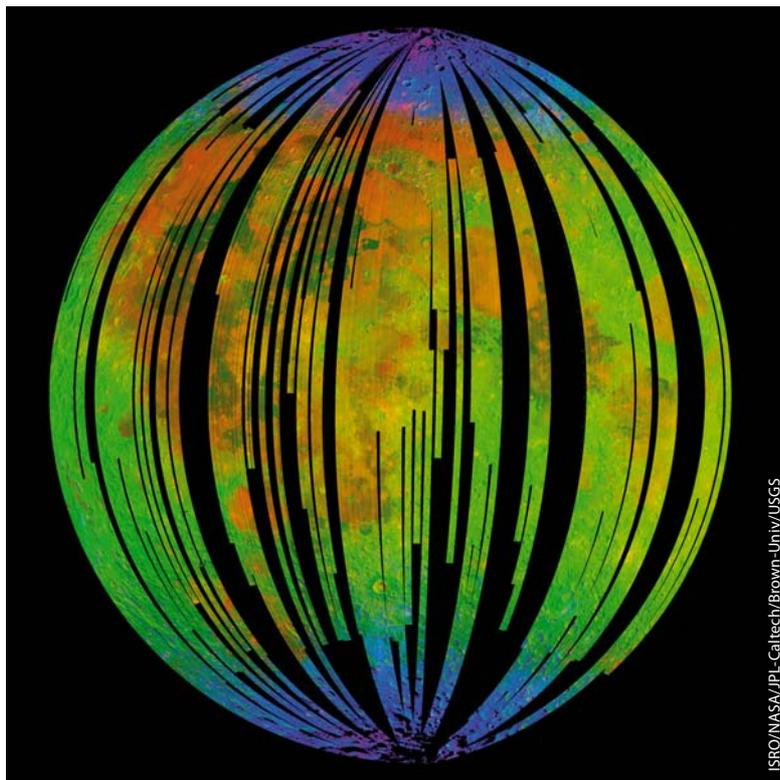
## ■ Unter Staub begraben?

Messungen dreier Raumsonden deuten darauf hin, dass sich Wasser auch auf dem Mond findet.

**W**asser ist auf der Erde die Voraussetzung für Leben. Auf dem Mond und auf anderen Planeten könnte es die bemannte Raumfahrt unterstützen. So lässt sich Wasser z. B. nutzen, um Raketentreibstoff zu gewinnen und damit die Exploration unseres Sonnensystems voranzutreiben. Für die Geologie spielt Wasser eine bedeutende Rolle, da es ein wichtiger Bestandteil in terrestrischen Magmen ist und große Auswirkungen z. B. auf deren Viskosität und Zusammensetzung hat. Neue Ergebnisse über Wasser auf dem Mond machen daher ein Umdenken in Bezug auf petrologische Modelle erforderlich und sind somit wichtig für unser Verständnis der geologischen Entwicklung des Mondes. So ist man bisher davon ausgegangen, dass der Mond durch den Einschlag eines Mars-großen Körpers entstanden ist, er in der Folge mehr oder weniger vollständig aufgeschmolzen war und dabei alles Wasser verloren hat. Vermutlich bedarf dieses einfache Modell einer Korrektur.

Die Frage nach Wasser auf dem Mond ist schwierig zu beantworten. Frühe Untersuchungen im Vorfeld der Apollo-Missionen gingen davon aus, dass gewundene Kanalstrukturen auf dem Mond Anzeichen für Wasser an der Oberfläche sind. Sogar über eine Permafrostschicht wurde spekuliert [1]. Spätestens seitdem die Apollo- und Luna-Missionen fast 400 kg Probenmaterial von der Mondoberfläche auf die Erde brachten, stand für die Forscher fest, dass unser Erdtrabant knochentrocken ist. So fehlen hydratisierte<sup>1)</sup> bzw. wasserhaltige Minerale in den Proben, dafür kommt metallisches Eisen vor, das sich extrem schnell umwandelt, wenn Wasser vorhanden ist. Die vereinzelten Rostspuren in den Proben wurden in der Vergangenheit als Kontamination auf der Erde interpretiert.

Erste Hinweise, dass diese alte Einschätzung falsch sein könnte,



Der Mond im Infrarotlicht, aufgenommen mit dem „Moon Mineralogy Mapper“ der NASA an Bord der indischen

Mondsonde Chandrayaan-1. Die blauen Gebiete deuten auf Spuren von Wasser hin.

lieferte 1994 die amerikanische Clementine-Mission, deren Radarexperiment ungewöhnlich hohe Reflexionen in den permanent im Schatten liegenden Polkratern nachwies [2]. Eine erste Interpretation ging davon aus, dass es sich in diesen „Kältefallen“ um Wassereisablagerungen handelt, die durch Ausdampfungsprozesse aus dem Inneren des Mondes oder durch Wasser, das durch Kometen zum Mond gelangt ist, gebildet wurden. Zwar stellte 1998 die Lunar Prospector-Mission fest, dass an den Polen die Konzentration an Wasserstoff erhöht ist. Jedoch ließ sich nicht zweifelsfrei klären, ob es sich um Wassereis handelt oder lediglich um eine Konzentration von Sonnenwindpartikeln [3]. Genaue Untersuchungen an vulkanischen Gläsern in Mondgesteinen erbrachten 2008 Hinweise auf bis zu 745 ppm Wasser im Mondinneren [4]. Bilder der japanischen Sonde Kaguya aus dem gleichen Jahr

zeigten, dass Wassereis unter einer Staubschicht begraben sein muss, falls es tatsächlich in den Polkratern auftritt [5]. Ein gezielter Absturz der amerikanischen LCROSS-Mission sollte diese Staubschicht im Oktober 2009 durchschlagen und Wassereis verdampfen, um es spektral zu detektieren [6]. Die Ergebnisse dieser Mission belegen laut einer NASA-Pressekonferenz am 13. November in der Tat das Vorhandensein von signifikanten Mengen an Wasser und Hydroxyl.

Kürzlich präsentierten drei Veröffentlichungen die Ergebnisse spektraler Beobachtungen der Raumsonden Chandrayaan, Deep Impact bzw. Cassini. Alle drei Missionen haben mittels Infrarotspektroskopie zweifelsfrei Absorptionsbanden bei einer Wellenlänge von etwa 3,0  $\mu\text{m}$  entdeckt. Da Vibrationen der OH-Gruppe diese spektrale Signatur hervorrufen, ist sie ein sehr guter Indikator für Wasser bzw. Hydroxyl. Zu den Polen hin

1) Die Hydratisierung bezeichnet eine chemische Reaktion, bei der Wasser an ein Substrat addiert wird.

nimmt diese Absorptionsbande zu. Diese Beobachtung bedeutet aber nicht zwingenderweise, dass wasserhaltige Phasen tatsächlich verstärkt vorkommen, da im Bereich ab  $2,6 \mu\text{m}$  thermische Emissionen auftreten, welche die Absorptionsbanden maskieren können. In den wärmeren Gebieten nahe dem Äquator sind diese Emissionen stärker ausgeprägt als an den Polen. Genaue Temperaturmessungen, die zur Kalibration dieses Effekts nötig wären, hat aber leider keine Mission durchgeführt.

### Dreifache Bestätigung

Spektren, die das Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) der Cassini-Mission beim Vorbeiflug am Mond aufgenommen hat, zeigen eine breite Absorptionsbande bei  $3,0 \mu\text{m}$ , die auf adsorbiertes Wasser zurückzuführen ist, sowie eine Bande bei  $2,8 \mu\text{m}$ , die auf OH-Gruppen hinweist [7]. Die Mengen an Wasser hängen u. a. von der Korngröße in der obersten Staubschicht, die durch kontinuierliche Meteoriteneinschläge entstanden ist, ab und davon, wie das Wasser dort verteilt ist. Modellrechnungen haben ergeben, dass zwischen 10 und 1000 ppm an Wasser nötig sind, um die beobachteten Absorptionsbanden zu erklären. Basierend auf den VIMS-Daten lässt sich argumentieren, dass das Wasser vermutlich über die Oberfläche zu den Polen migriert und sich dort in den kalten Polkratern ansammelt.

Die Daten der Deep Impact Mission weisen darauf hin, dass bis zu 0,5 Gewichtsprozent Wasser an den Polen auftreten können [8]. Die Sonde hat den Mond zu verschiedenen Zeiten beobachtet und innerhalb einer Woche – das entspricht dem Viertel eines Mondtages – Unterschiede in der Hydratisierung gefunden. Diese Unterschiede waren besonders stark in vulkanischen Marebasaltgebieten und weniger stark in hellen Hochlandgebieten ausgeprägt. Die Maregebiete verlieren also an einem Mondvormittag mehr Wasser als Hochlandgebiete. Diese periodische Zu- und Abnahme der Konzentration im Laufe eines Mondtages lässt

auf einen dynamischen Hydratisierungsprozess schließen. Da die gesamte Mondoberfläche hydratisiert wird und die absoluten Konzentrationen relativ gering sind, ist anzunehmen, dass der Sonnenwind dies verursacht. Mit der Zeit könnten die Hydratisierung und Dehydratisierung dazu führen, dass sich  $\text{H}^+$  und  $\text{OH}^-$  zu den Polen verlagern, was ihre erhöhte Konzentration dort erklären würde.

In den Daten des Moon Mineralogy Mapper ( $\text{M}^3$ ) Spektrometers an Bord der indischen Raumsonde Chandrayaan sind die Absorptionsbanden bei  $2,8$  und  $3,0 \mu\text{m}$  weit verbreitert [9]. In den kühleren hohen Breitengraden und in mehreren frischen feldspatreichen Kratern ist die OH-Konzentration höher. Interessanterweise sind die mit  $\text{M}^3$  gemessenen Absorptionsbanden nicht mit den Wasserstoffkonzentrationen des Neutronenspektrometers von Lunar Prospector korreliert. Zu erklären ist dies damit, dass  $\text{M}^3$  nur die obersten Millimeter der Oberfläche untersucht hat, während das Neutronenspektrometer Wasserstoff bis in eine Tiefe von 50 cm aufspüren konnte, wo er vor dem Verlust in den Weltraum geschützt ist. Die  $\text{M}^3$ -Ergebnisse zeigen, dass an der Mondoberfläche entweder hydratisierte Mineralphasen oder ein Hydratisierungsprozess auftre-

ten. Solche wasserhaltigen Minerale fehlen in den Apolloproben – vermutlich aufgrund der begrenzten Probenahme. Diese Minerale könnten aus dem Mondinneren stammen und durch frische Krater an die Oberfläche gelangt sein, oder sie könnten sich beim Einschlag wasserhaltiger Asteroiden oder Kometen gebildet haben. Andererseits ist es auch möglich, dass Wasser und OH durch die Reduktion von zweiwertigem Eisen zu metallischem Eisen durch den Beschuss mit Sonnenwindprotonen kontinuierlich entstehen. Nachdem nun alles darauf hindeutet, dass sich tatsächlich Wasser auf dem Mond findet, stellen sich den Forschern neue Fragen: Woher kommt es? Wie viel ist vorhanden? In welcher Form liegt es vor? Wo ist es konzentriert?

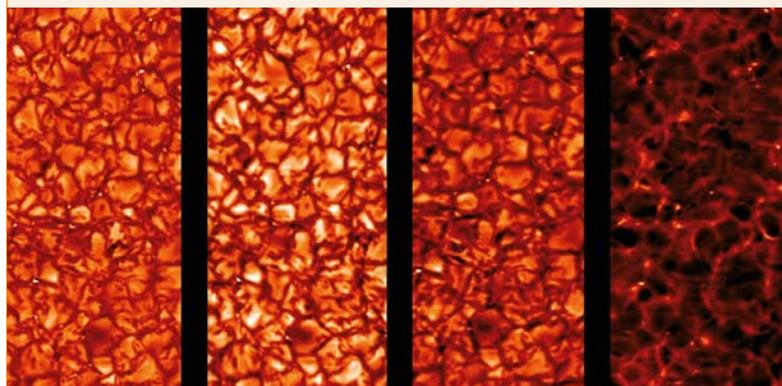
Harald Hiesinger

- [1] S. J. Peale et al., *Nature* **220**, 1222 (1968)
- [2] S. Nozette et al., *Science* **266**, 1835 (1994)
- [3] W. C. Feldman et al., *Science* **281**, 1496 (1998)
- [4] A. E. Saal et al., *Nature* **454**, 192 (2008)
- [5] J. Haruyama et al., *Science* **322**, 938 (2008)
- [6] A. Colaprete et al., *LPI Contrib.* **1415**, abstract 2012 (2008)
- [7] R. N. Clark, *Science* **326**, 562 (2009)
- [8] J. M. Sunshine et al., *Science* **326**, 565 (2009)
- [9] C. M. Pieters et al., *Science* **326**, 568 (2009)

### KÖRNIGE SONNE

Mit bisher unerreichter Detailauflösung zeigen neue Bilder die Oberfläche der Sonne im ultravioletten Spektralbereich zwischen 300 nm (links) und 397 nm (rechts). Die Bilder sind die ersten Ergebnisse des Ballontelestroskops SUNRISE, das Anfang Juni die Sonne fünf Tage lang aus einer Höhe von 37 Kilometern beobachtet hat.

Die Kollaboration aus deutschen, spanischen und amerikanischen Forschern erhofft sich von SUNRISE neue Erkenntnisse über das komplexe Wechselspiel von Magnetfeldern und Wärmekonvektion, das zu der körnigen Oberflächenstruktur der Sonne führt. Die Ausschnitte zeigen jeweils 1/20 000 der gesamten Sonnenoberfläche.



MPS