

Beiträge zur spektralen Fernerkundung fester planetarer Oberflächen

G. Arnold

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Planetenforschung, Berlin



Einführung:

Das Studium der Entstehung, Entwicklung und Geschichte der planetaren Körper und des Planetensystems als Ganzes erfordert detaillierte Kenntnisse der Eigenschaften der unterschiedlichen Körper des Sonnensystems. Die Untersuchung der Objekte unseres Sonnensystems mit Methoden der Fernerkundung zielt auf das Verständnis des aktuellen Entwicklungszustandes der Körper und deren Genesis im Planetensystem. Von besonderer Bedeutung sind dabei auch vergleichende Analysen der unterschiedlichen geologischen, stofflichen-chemischen, mineralogischen, geophysikalischen, meteorologischen und klimatischen Prozesse auf den verschiedenen Körpern, auch für Rückschlüsse der planetaren Evolution der Erde. In zunehmendem Maße gewinnen dabei neben erdgestützten Teleskopbeobachtungen Raumfahrtexperimente an Bedeutung, die es erlauben, die Objekte aus deren Orbit oder mit Landegeräten am Boden aus nächster Nähe zu analysieren. Das Gro unseres heutigen Wissens über das Planetensystem beziehen wir aus Fernerkundungsuntersuchungen.

Für die stofflich-physikalische Erkundung der Oberflächen der erdähnlichen Planeten Merkur, Venus und Mars sowie für Untersuchungen der Kleinkörper des Sonnensystems werden spektrale und radiometrische Methoden eingesetzt. Sie gestatten es, die stofflich-mineralogische Zusammensetzung (Gesteine, Minerale, Eise und Kondensate), die physikalischen Eigenschaften (kinetische Temperatur, thermische Trägheit, Leitfähigkeit) sowie Texturparameter (Teilchengrößen, Packungsdichten) der planetaren Böden zu studieren. Anhand dieser Parameter können Prozesse der planetaren Evolution der Oberflächen modelliert werden.

Der Beitrag gibt eine Übersicht über laufende und geplante Experimente, wie Mars Express, Rosetta und Bepi Colombo. Er diskutiert instrumentelle, methodische Grundlagen und präsentiert aktuelle Ergebnisse der Exploration.



Mars- Die Verwitterungsprozesse der Oberfläche:

Die Oberfläche des Mars ist spektral charakterisiert durch dunkle und helle Gebiete. Die dunklen Gebiete mit einer Albedo von bis zu 0,2 entsprechen den Vulkaniten der primären Krustengesteine (Basalte und Andesite, Bandfield, 2000). Helle Gebiete mit einer Albedo bis zu 0,4 dominieren die Oberfläche des Mars und sind Verwitterungsprodukte des ursprünglichen Materials. Ihr Studium ist eine wesentliche Quelle für Informationen zur klimatologischen und geologischen Entwicklung des Mars in den Epochen des Noachian (3,7 Mrd. J oder älter), Hesperian (3,7 - 2 Mrd. J) und Amazonian (bis zur Neuzeit). Spektrale Untersuchungen der hellen Gebiete zeigen neben Fe³⁺-Banden von Kristallwasser bei 2,8 μ m, die als Hinweise auf Nontronit gewertet werden. Unter den trockenen Bedingungen der Verwitterung des Mars in der Neuzeit ist im Rahmen tertiärer Prozesse der Verwitterung die Bildung von Sulfaten wahrscheinlich, die erstmals spektral von Mars Express nachgewiesen werden konnten (Bibring, 2005). Das Studium der Hydratisierung und der Nachweis der Salze sind wichtige Ergebnisse der Mars Express Mission (Experimente HRSC, Neukum 2005, Omega, Bibring 2005 und PFS, Formisano 2005).

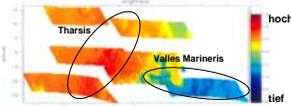
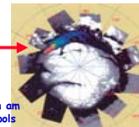


Fig. 3: Beinroth, Arnold, 1996, 2,9- μ m Bandentiefen, Variation der Oberflächenhydratierung, ISM Areale/ Mars, äquatornah

Fig. 4:

Bibring et al., Science 2005, Nachweis von Sulfatvorkommen am Rande des Nordpols



Vergleichende Laboruntersuchungen von Anomalaterial:

Für die Modellierung des Strahlungstransports in inhomogenen Medien, wie in Mineralen existiert keine geschlossene theoretische Beschreibung. Die von Hapke (1996) entwickelte Theorie der bidirektionalen Reflexanz und direktionalen Emittanz versagt bei starker Absorption innerhalb der charakteristischen Identifizierungsbanden. Laboruntersuchungen an relevanten Vergleichsmaterialien sind deshalb erforderlich, um die Identifizierungsbedingungen von Mineralen und Gesteinen in Fernerkundungsanalysen zu sichern. Zudem sind die Oberflächen terrestrischer planetarer Körper, wie Merkur, Mond, Mars u.a. mit feikörnigem mineralen Staub bedeckt (Regolith) dessen Teilchengrößen im μ m-Bereich die Größenordnung der Wellenlänge der wechselwirkenden Strahlung erreicht. Im Übergangsbereich der solaren Reflexion und der thermischen Eigenstrahlung führen konkurrierenden physikalische Prozesse von Absorption und Emission zu zusätzlicher Beeinträchtigung der Nachweisempfindlichkeit von Salzen in planetaren Böden (Witzke, Arnold et al. 2006).

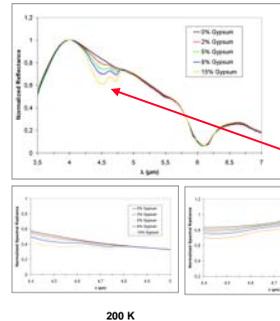


Fig. 5:

Reflexionsspektren verschiedener Gewichtanteile von Gips in einer Palagonitmatrix (Teilchengrößen <25 μ m)

Identifizierung von Sulfaten anhand von charakteristischen Absorptionsbanden nahe 4,7 μ m.

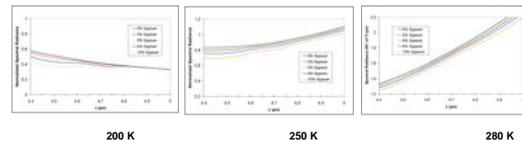


Fig. 6: Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Identifizierungsbedingungen von Sulfaten auf der Marsoberfläche (Teilchengrößen <25 μ m): Messungen zeigen, dass bei Temperaturen zwischen 250 und 280 K der Einfluss der thermischen Eigenstrahlung auf die Detektierbarkeit der 4,7- μ m Bande dazu führt, dass die Bande bei Oberflächentemperaturen zwischen 250 und 280 K bei bis zu 15wt% von Gips in der mineralen Mischung im Spektrum verborgen bleibt.

Rosetta- Untersuchung von 67P/Churyumov-Gerasimenko:

Die Untersuchung von Materie aus den frühen Phasen der Entstehung unseres Planetensystems zielt auf das Verständnis seiner Evolution, der Herkunft des Wassers auf planetaren Körpern und auf die Entstehung des Lebens. Neben den bei der Erforschung planetarer Oberflächen wesentlichen Fragen des Studium der anorganischen stofflichen Komponenten stehen in der Kometenforschung Untersuchungen zur Beschaffenheit organischer Komponenten im Mittelpunkt. Die 2004 gestartete ESA-Mission Rosetta wird den Kometen Churyumov-Gerasimenko in ca. 3,2 AU von der Sonne entfernt analysieren und erstmals ein Landegerät positionieren, um mit der Reise des Kometen ins Innere des Sonnensystems, dessen Struktur und Beschaffenheit zu analysieren.



Fig. 7: 24 Februar 2004 67P/Churyumov-Gerasimenko

Rosetta- Untersuchung des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko:

VIRTIS – Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer der ESA- Cornerstone Mission:

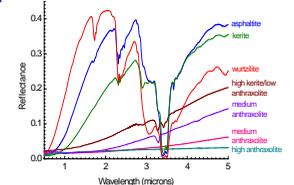
Fig. 8: VIRTIS ist ein abbildendes Zweikanal-Spektrometer für den Wellenlängenbereich von 0,25 bis 5 μ m, das von I, F und D (DLR, KT, EADS) entwickelt wurde. Es erlaubt sowohl die räumlich hochauflösende spektrale Kartierung des Kometenkerns als auch die Analyse der kometaren Halo und Koma sowie organischer Materialien in hoher spektraler Auflösung.



- Identifizierung komplexer organischer Bestandteile der Oberfläche

Fig. 9: Laboruntersuchungen terrestrischer Analoga für mögliche komplexe organische Bestandteile der Kometenoberfläche

Moroz, Arnold, et al., Icarus (1998, 2000)



MERTIS auf Bepi Colombo - die mineralogische Kartierung der Oberfläche des Merkur:

Die unterschiedlichen Entwicklungen der terrestrischen Planeten (physikalische Größen, Geologie, Klima) werden gegenwärtig nur unzureichend verstanden. Eine große Lücke in der Exploration des Planetensystems ist der sonnennächste Planet Merkur. Die ESA-Cornerstone Mission Bepi Colombo wird mit dem Start 2013 Ziel dieser Untersuchungen sein, die auch eine spektrale Kartierung des Planeten zur Erkundung seiner Mineralogie und Oberflächentemperatur vornehmen wird. MERTIS ist ein am DLR entwickeltes Mercury Thermal Infrared Spectrometer, welches unter wissenschaftlicher Leitung der Universität Münster diese Untersuchungen vornehmen wird. Im Wellenlängenbereich von 7 bis 14 μ m sollen die Reststrahlenbanden der wichtigsten gesteinsbildenden Mineralen ermittelt werden.

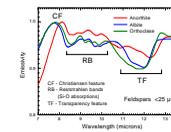


Fig. 10: 7 - 14 μ m, 1 km Bodenaufklärung, 90 nm spektrale Auflösung, μ -Bolometer-Technologie, Telezentrisches Three Mirror Anagmat mit Offner Spektrometer, all refraktiv beugungsbegrenzt, miniaturisiert, leichtgewichtig.



Zusammenfassung:

Die spektrale Untersuchung fester planetarer Oberflächen liefert wesentliche Informationen über die stofflich-mineralogische Beschaffenheit der Böden, die es gestattet Prozesse der Pflanzenformung im Vergleich der verschiedenen Körper des Planetensystems zu diskutieren.

Methodische Grundlagen der spektralen Untersuchung planetarer Oberflächen im UV/VIS/IR

Die in der Fernerkundung nutzbare Quelle der Untersuchung ist trotz des Vordringens aktiver Methoden der Fernerkundung primär die von planetaren Oberflächen reflektierte Solarstrahlung im UV/VIS/NIR und die thermische Eigenstrahlung der Objekte.

Das Planeten Fourier Spektrometer (PFS) auf Mars Express:

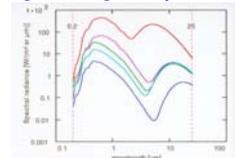


Fig. 1: Spektrale Strahlende planetarer Objekte

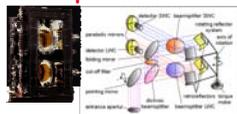


Fig. 2:

Optisches Layout des Doppel-Pendel-Interferometers für die Untersuchung der Marsatmosphäre- und Oberfläche im Bereich von 1,25 bis 45 μ m bei einer spektralen Auflösung von 0,2 bis 11 nm und einer Bodenaufklärung von 7 bis 20 km.