

Die wissenschaftlichen Instrumente von Mars Express

Instrumente auf dem Orbiter

Das komplexe Forschungsprogramm von Mars Express wird mit Instrumenten auf dem Orbiter und dem Lander durchgeführt. Dabei lassen sich die Experimente, die vom Orbiter ausgeführt werden, in zwei Gruppen einteilen:

1. **Experimente zur Untersuchung der Marsoberfläche und des Marsbodens**
HRSC (High Resolution Stereo Camera)
OMEGA (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer)
MARSIS (Subsurface Sounding Radar Altimeter)
2. **Experimente zur Erforschung der Atmosphäre und Ionosphäre**
PFS (Planetary Fourier Spectrometer)
SPICAM (Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer)
ASPERA (Energetic Neutral Atoms Analyser)
MARS (Mars Radio Science Experiment)

An der wissenschaftlichen und technischen Realisierung der Instrumente an Bord des Orbiters beteiligte Institute und Universitäten in Deutschland, Österreich sowie in der Schweiz

Deutschland:

- + DLR-Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Berlin
- + DLR-Institut für Raumsimulation, Köln
- + FU Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften
- + Max-Planck-Institut für Aeronomie Katlenburg-Lindau
- + Universität Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie
- + Universität der Bundeswehr; Institut für Photogrammetrie und Kartographie; München
- + Universität der Bundeswehr; Institut für Raumfahrttechnik, München
- + TU Dresden, Institut für Kartographie
- + Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen
- + Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Österreich:

- + TU Wien; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Schweiz

- + Universität Bern, Physikalisches Institut

An allen Instrumenten sind multinationale Firmen- und Forschergruppen sowie Institutionen mehrerer Länder beteiligt. In der folgenden Beschreibung wurde deshalb nur der für das jeweilige Instrument verantwortliche Wissenschaftler und dessen Institution aufgeführt.

1. ASPERA: Energetic Neutral Atoms Analyser

Ein ungelöstes Problem ist das Verschwinden der Marsatmosphäre. Vor 4 Mrd. Jahren war sie noch mit der Erdatmosphäre vergleichbar. Heute beträgt der atmosphärische Druck auf dem Mars lediglich noch 7 mb, das sind 0,6 % des Luftdruckes auf der Erde. Nach den aktuellen Erkenntnissen der Forscher spielt das Vorhandensein eines Magnetfeldes sowie die Größe eines Planeten und damit die Stärke des von ihm ausgehenden Gravitationsfeldes eine entscheidende Rolle. Deshalb besitzt die Erde auch noch ihre Atmosphäre.

Das Magnetfeld lenkt den von der Sonne ausgehenden Strom geladener hochenergetischer Partikel, den Sonnenwind, ab, so dass nur ein geringer Teil davon mit den oberen Schichten der Atmosphäre in Interaktion tritt. Das Erdmagnetfeld wirkt also als ein unsichtbarer Schutzschirm. Dieser dem Mars fehlende Schutz bewirkt hingegen, dass die Sonnenwindteilchen atmosphärische Atome ionisieren (also elektrisch aufladen, so dass sie nicht mehr energetisch neutral sind), und die so geladenen Teilchen aus der Atmosphäre heraus in den Weltraum "blasen". Auf diese Weise hat der Mars den größten Teil seiner Atmosphäre verloren.

Ist der Sonnenwind aber allein dafür verantwortlich und verschwand auf diese Weise auch das früher einmal auf der Marsoberfläche vorhandene Wasser? Und wieviel Wasser hat der Mars in den letzten

vier Milliarden Jahren verloren? Diese Fragen sollen mit dem ASPERA-System beantwortet werden. Die Sensoren des Instruments werden dazu die Zusammensetzung der Marsatmosphäre sowie die räumliche und quantitative Verteilung einzelner Komponenten ermitteln.

ASPERA hat insgesamt vier Sensoren:

- einen Energetic Neutral Atoms Imager (ENA)
- den Neutral Particle Detector
- einen Ion Mass Analyser
- ein Electron Spectrometer

Der ENA-Imager erstellt ein globales Bild des Teils der oberen Atmosphäre, die mit dem Sonnenwind interagiert. Energiegeladene neutrale Atome werden durch Magnetfelder in ihrer Bewegungsrichtung nicht beeinflusst und können so ungestört aus der Ionosphäre in die darunterliegende Atmosphäre eindringen. Dort geben sie ihre überschüssige Energie wieder ab. Diese Wechselwirkungen erfasst der Imager. Im entferntesten Punkt der Umlaufbahn des Orbiters kann so ein Bild des gesamten Planeten mit der Dichteverteilung des Plasmas in der oberen Atmosphäre gewonnen werden.

Der ENA-Detektor wiederum erfasst ausschließlich Wasserstoff- und Sauerstoffatome mit einer Energie im Bereich von 0,1 bis 10 KeV, den beiden Bestandteilen von Wassermolekülen. Er bestimmt nicht deren räumliche Verteilung, sondern erfasst die Anzahl der Atome, welche mit dem Sonnenwind interagieren. Die Wissenschaftler wollen daraus Rückschlüsse über die verloren gegangene Wassermenge ziehen.

Um die Wechselwirkungen zwischen Sonnenwind und Atmosphäre besser verstehen zu können, ermittelt ein Ion Mass Analyser die Menge und die Massen verschiedener Ionen der oberen Marsatmosphäre. In Ergänzung dazu wird mit einem Elektronenspektrometer der Elektronenfluss im Energiebereich bis zu 20 000 eV gemessen.

Die Kombination der Messergebnisse der vier Sensoren mit verschiedenen Aufgaben wird ein bisher einmaliges Bild von den Prozessen in der Marsatmosphäre ergeben.

ASPERA wurde ursprünglich für die russische Mars-96 Mission entwickelt und für Mars Express in einer verbesserten Version gebaut.

Principal Investigator: Dr. Rickard Lundin, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna

2. HRSC: High/Super Resolution Stereo Color Imager

Das Hauptinstrument an Bord des Orbiters ist das Kamerasystem HRSC (High Resolution Stereo Camera), das detaillierte Bilder von der Marsoberfläche liefern wird. Die spezielle Anordnung von Optik und Sensoren erlaubt die Erzeugung von dreidimensionalen Aufnahmen. Mit der HRSC wird es erstmals möglich sein, eine Planetenoberfläche systematisch in der dritten Dimension und in Farbe abzubilden. Ein zusätzlicher höchstauflösender Kanal (SRC- Super Resolution Channel) liefert eingebettet in den geologischen Kontext der HRSC- Aufnahmen Bilder mit einer hohen Punktgenauigkeit von ausgewählten Gebieten des Mars. Das könnte besonders bei der Suche nach früheren oder künftigen Landegebieten von Interesse sein.

Ziel ist es, die komplette Marsoberfläche mit einer Auflösung von kleiner als 30-40 m/Pixel und 50 % der Oberfläche mit kleiner als 15-20 m/Pixel zu kartografieren. Außerdem erwarten die Forscher von den Aufnahmen auch neue Daten über die Wolkenbedeckung, die berühmten Sandstürme, Wechselwirkungen zwischen der Marsatmosphäre und seiner Oberfläche, die Entwicklung des Vulkanismus, das Marsklima, die Rolle des Wassers im Verlauf der Marsgeschichte und natürlich auch neue Anhaltspunkte für die Suche nach potentiellen Wasser-Ressourcen. Weitere Beobachtungsziele sind die beiden Marsmonde Phobos und Deimos. Eine am Ende der Mission erstellte topografische Gesamtkarte soll vielfältige anderweitige Untersuchungen unterstützen, so über den inneren Aufbau des Roten Planeten sowie seine klimatische und geologische Entwicklung.

Die hochauflösende Stereokamera wurde am DLR-Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung in Berlin-Adlershof ursprünglich für die russische Raumsonde Mars-96 entwickelt und gebaut. Nach dem Fehlstart kommt nun eine weiterentwickelte Variante bei Mars Express zum Einsatz.

Im Perizentrum (der größten Annäherung an den Mars) überfliegt Mars Express die Oberfläche in 250 km Höhe. Hier erreicht das HRSC-System seine beste Auflösung mit 10 m/Pixel und hat damit die günstigsten Aufnahmebedingungen. Der hochauflösende Spezialkanal SRC liefert in diesem Bereich Bilder mit 2,3 m Auflösung. "Der hochauflösende Kanal wird es uns erlauben, den Lander Beagle 2 auf der Oberfläche ausfindig zu machen" erläuterte Gerhard Neukum, der Principal Investigator des Instrumentes, die erwartete Leistungsfähigkeit der Kamera. Früher eingesetzte Kamerasysteme konnten immer nur begrenzte Gebiete mit hoher Auflösung oder große Gebiete mit geringer Auflösung erfassen. Die Folge war, dass der Ort hochauflösender Aufnahmen ohne Referenzpunkte nur ungenau bestimmt werden konnte.

Arbeitsweise des Kamerasystems

Die elektronische Kamera besitzt insgesamt zehn Aufnahmekanäle, neun für die HRSC mit der niedrigeren Auflösung sowie einen für die SRC-.

Die Aufnahme erfolgt elektronisch mittels CCDs (Charge Coupled Devices), das sind lichtempfindliche Halbleiter, die das auf sie fallende Licht in ein proportionales elektrisches Signal wandeln. Bei der HRSC befinden sich pro Kanal 5184 CCDs in einer Zeile. Die neun Zeilen sind senkrecht zur Flugrichtung angeordnet und werden – angepasst an die Überfluggeschwindigkeit – in bestimmten Zeitabständen ausgelesen. Auf diese Weise wird ein etwa 52 Kilometer breiter Streifen der Oberfläche abgetastet (gescannt).

Die neun HRSC- Kanäle wurden für unterschiedliche Aufgaben ausgelegt. Drei nehmen die roten, grünen und blauen Spektralbereiche auf, ein weiterer den nahen Infrarotbereich. Dazu kommen drei so genannte Stereokanäle zur späteren Berechnung der dreidimensionalen Bilder. Diese Kanäle "schielen": Je einer schaut schräg nach vorn bzw. schräg nach hinten und ein weiterer senkrecht nach unten. Aus diesen verschiedenen Blickwinkeln heraus lassen sich mittels photogrammetrischer Verfahren 3D-Geländemodelle errechnen.

Die Daten von zwei weiteren Kanälen dienen der photometrischen Analyse des Mars und werden für die Berechnung der Geländemodelle hinzugezogen.

Der SRC-Kanal arbeitet ebenfalls mit CCDs, hat aber einen Flächensensor. Der besteht aus einer Matrix von 1024 x 1032 Elementen, so dass jedes Bild aus rund 2 Mill. Pixeln besteht.

Im normalen Betrieb arbeiten HRSC und SRC simultan. Die SRC-Bilder werden in den Aufnahmestreifen der HRSC integriert. So ist später aufgrund des weitgehend kontinuierlichen HRSC-Aufnahmestreifens eine genaue Positionierung der hochauflösenden Aufnahmen auf der Marsoberfläche möglich.

Aus technischen Gründen kann der von allen zehn Kanälen erzeugte Datenstrom nicht ohne weitere Bearbeitung zur Erde übertragen werden. Pro Tag besteht nur eine Verbindung von maximal acht Stunden zur Erde, so dass die Übertragungskapazität eingeschränkt ist. Die Lösung dafür heißt Datenreduktion und/oder Kompression. So lassen sich die umfangreichen Bilddaten ohne merkliche Qualitätsverluste je nach angewandtem Verfahren um den Faktor vier bis zehn reduzieren.

Principal Investigator: Das DLR-Institut für Weltraumsensorik und Planetenforschung in Berlin-Adlershof ist verantwortlich für den Betrieb der Kamera sowie für die Verarbeitung und Verteilung der Bilddaten; die wissenschaftliche Leitung des HRSC-Experiments liegt bei Prof. Gerhard Neukum von der FU Berlin.

3. MARSIS: Subsurface Sounding Radar/Altimeter

Eine wichtige Aufgabe ist die Suche nach noch vorhandenem Wasser auf dem Roten Planeten. Die Daten der amerikanischen Raumsonde Mars Global Surveyor lassen vermuten, dass auch heute noch Wasser aus dem Marsboden an die Oberfläche gelangt, wo es sich aber nicht lange halten kann. Verschiedene Experimente an Bord des Orbiters dienen der Untersuchung des Verbleibs des früher offensichtlich reichlich vorhandenen Mars-Wassers und der Suche nach heutigen Ressourcen. Das MARSIS-Radar wurde speziell dafür konstruiert, nach Wasser und Eis im Marsboden zu suchen. Eine zweite Aufgabe ist die Sondierung der Ionosphäre.

Radiowellen werden normalerweise von einer beliebigen Oberfläche reflektiert. Besonders langwellige Signale dringen jedoch in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge in das Material ein – in diesem Fall den Marsboden – und werden erst an den Grenzflächen zwischen zwei Lagen verschiedenartigen Materials zurückgeworfen. Wenn derartige Schichten Wasser oder Eis enthalten, wird das Radiosignal reflektiert. Aus der Stärke eines zweiten Echos kann die Art der reflektierenden Schicht ermittelt werden. Wiederum aus der Zeitdifferenz zwischen beiden Echos kann dann die entsprechende Tiefe der Schicht

ermittelt werden. Da das Instrument mit zwei Signalen unterschiedlicher Frequenz arbeitet, die immer gleichzeitig ausgesandt werden, können auch Rückschlüsse auf die elektrischen Eigenschaften der reflektierenden Materialien gezogen werden. So unterscheiden sich die elektrischen Eigenschaften von Wasser und Gestein erheblich. Damit läßt sich die obere Grenzschicht wasserführenden Gesteins leicht ermitteln.

MARSIS arbeitet mit insgesamt vier Frequenzen: 1,9 MHz, 2,8 MHz, 3,8 MHz und 4,8 MHz. Die beiden niedrigeren Frequenzen (größere Wellenlänge) eignen sich am besten für die Aufgabe, können jedoch nur nachts eingesetzt werden, da am Tag die Beeinträchtigung durch die Ionosphäre zu groß ist. Bestimmende Elemente des Gerätes sind zwei 20 Meter lange Antennen zum Aussenden der Radarimpulse und dem Empfang der Echos, die erst im Marsorbit ausgerollt werden. So wird es möglich sein, den Marsboden bis in eine Tiefe von 5 km zu untersuchen.

Principal Investigator: Prof. Giovanni Picardi, Università di Roma 'La Sapienza'; Rom

4. MARS: Mars Radio Science Experiment

MARS als Radiosondierungsverfahren bietet den Forschern Wissenschaft zum Nulltarif. Bei dem Experiment werden die zwischen Mars Express und der Bodenstation ausgetauschten Signale im S-Band (2,3 GHz) und X-Band (8,4 GHz) genutzt, um aus ihrer Beeinflussung durch den Mars und seiner Umgebung Rückschlüsse auf die Atmosphäre, das Schwerefeld und die Marsoberfläche zu ziehen.

Beeinflussung bedeutet, dass Veränderungen der Frequenz und Phase, Amplitude, Polarisation oder der Laufzeit eines in seinen Parametern bekannten Radiowellen-Trägersignals ermittelt werden. Wenn dieses Trägersignal neutrale oder ionisierte Medien (z.B. eine Planetenatmosphäre) durchläuft, an Planetenoberflächen reflektiert wird, die Entfernung zwischen Raumsonde und Bodenstation sich ändert oder Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie wirken, ändern sich ein oder mehrere der genannten Parameter. Daraus können wiederum Daten über die das Signal beeinflussenden Objekte abgeleitet werden. Solche Verfahren werden unter dem Begriff Radio-Sondierung zusammengefasst. Bezogen auf den Mars ergeben sich bei der Anwendung dieses Verfahrens verschiedene interessante Forschungsaufgaben:

Untersuchung von Atmosphäre/Ionosphäre

Bei den meisten Orbits um den Mars bewegt sich die Raumsonde – aus Erdsicht – hinter unserem Nachbarplaneten und wird durch ihn eine bestimmte Zeit verdeckt. Kurz vor dem Verschwinden und nach dem Wiederauftauchen durchqueren die zwischen Orbiter und Bodenstation ausgetauschten Signale die Marsatmosphäre und -ionosphäre. Dabei wird das Signal gebrochen und phasenverschoben. Durch die Messung der Frequenz lassen sich die Änderungen gegenüber dem Originalsignal ermitteln. Aus der eingehenden Analyse der Änderungen wiederum lassen sich Dichte, Temperatur und Druck der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe über der Marsoberfläche ermitteln.

Gravitationsanomalien

Inhomogene Masseverteilungen in einem Himmelskörper beeinflussen örtlich sein Gravitationsfeld und damit auch die Bahnen von Raumfahrzeugen, die sich in einer Umlaufbahn befinden. Durch die Bahnverfolgung mit Hilfe der Zwei-Wege-Radiosondierung können genaue Daten über Entfernung und Geschwindigkeit entlang der Sichtlinie zwischen Bodenstation und Satellit gewonnen werden. Daraus lassen sich dann die auf die Sonde wirkenden Gravitationskräfte berechnen. Aus der gemeinsamen Auswertung der Flugbahn mit den berechneten Kräften kann dann wiederum die dreidimensionale Masseverteilung eines Himmelskörpers ermittelt werden.

Bistatisches Radar

Wenn Sender (Bodenstation) und Transmitter (Raumsonde) räumlich getrennt sind, spricht man von einem bistatischen Radar. Bei der Stationierung des Transmitters auf der Planetenoberfläche oder an Bord des Orbiters kann die Rauigkeit der Oberfläche in der Größenordnung des Wellenlängenbereichs bestimmt werden.

Untersuchung der Sonnenkorona

Im Herbst 2004 und im Herbst 2006 befinden sich der Mars sowie Mars Express – aus irdischer Sicht – hinter der Sonne und bieten damit hervorragende Möglichkeiten zur Untersuchung der Sonnenkorona: "Für acht Wochen wird sich der Mars hinter der Sonne befinden, so dass das Radiosignal die Sonnenkorona – die Atmosphäre der Sonne – durchqueren muss. Jede Frequenz- oder

Phasenänderung, die durch die Sonnenkorona hervorgerufen wird, überdeckt alle anderen Signaleinflüsse. So werden wir diese Chance ergreifen und Sonnenforschung zum Nulltarif betreiben", erklärt Martin Pätzold, der Principal Investigator des Experiments. Er hofft auf die Bestimmung der koronalen Dichteverteilung und das Studium des Sonnenwindes an seiner Ursprungsregion.

Principal Investigator: Dr. Martin Pätzold, Universität Köln

5. OMEGA: IR Mineralogical Mapping Spectrometer

Das Wissen über die geologische Zusammensetzung der Marsoberfläche ist derzeit nur sehr begrenzt, da bisher kein Fernerkundungsinstrument für den Mars eingesetzt wurde. OMEGA wird das erste Gerät dieser Art sein, das die Marsoberfläche mit einer Auflösung im Bereich von 1 bis 4 km vollständig erkunden wird. Ausgewählte Gebiete können auch mit einer Bodenauflösung von 300 m aufgenommen werden, aber nur dann, wenn sich der Orbiter im Perizentrum der Umlaufbahn befindet.

Das zweite Problem, welches das Spektrometer beantworten soll, ist das Vorhandensein von Karbonaten auf dem Mars. Karbonate haben sich aus Kohlendioxid (CO₂) durch Reaktion mit Metallen wie Eisen, Magnesium oder Kalzium in Wasser gebildet. Wenn nun Karbonate auf dem Mars vorhanden sind, müssen demzufolge auch Wasser und CO₂ existiert haben.

OMEGA basiert auf dem ISM-Gerät für die Marssonde Phobos 2. OMEGA wurde in zahlreichen Punkten verbessert und wird damit auch als Instrument der zweiten Generation bezeichnet. Das Gerät wurde ursprünglich für Mars-96 gebaut. Das weiter modifizierte Reservegerät wird nun auf Mars Express fliegen.

Das Spektrometer arbeitet in zwei Kanälen, einem im sichtbaren Wellenlängenbereich (0,5-1,0 µm) und einem im infraroten Bereich (1,0-5,2 µm). Beide Kanäle verwenden jeweils ein eigenes Teleskop, ein Spektrometer und einen optoelektronischen Detektorkopf, welcher das eingefangene Licht in elektrische Signale wandelt.

Enges Zusammenwirken mit den Teams anderer Instrumente

Die Aufgabenstellungen von OMEGA, der HRSC-Kamera und dem Planetary Fourier Spectrometer (PFS) überlappen und ergänzen sich gegenseitig. Deshalb arbeiten die Teams eng zusammen. Alle drei Experimente haben gemeinsame Co-Investigatoren.

Die größten Gemeinsamkeiten gibt es zwischen OMEGA und PFS. Beide Instrumente analysieren Spektren in verschiedenen Wellenlängen. PFS hat ein niedrigeres räumliches Auflösungsvermögen, dafür aber eine höhere Spektralauflösung. Es eignet sich deshalb besser für die Untersuchung der Atmosphäre. Durch die Kombination der Daten von OMEGA und PFS können jedoch Synergieeffekte für atmosphärische, klimatologische und geologische Fragestellungen erzielt werden.

Principal Investigator: Dr. Jean-Pierre Bibring, Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay

6. PFS: Planetary Fourier Spectrometer

Unsere Forschungen zur Marsatmosphäre lassen noch viele weiße Flecken erkennen. Noch unbekannt ist, wie sich Temperatur und Druck in Abhängigkeit von der Höhe verhalten. Auch der Staub in der Atmosphäre und sein Einfluss auf das Marswetter sind noch nicht erforscht. Die mit PFS gewonnenen Daten sollen einige dieser Fragen beantworten helfen. Das Spektrometer wird vertikale Temperatur-Druck-Profile des CO₂ erstellen. Wenn am Ende der Mission Millionen derartiger Profile vorhanden sind, lassen sich daraus weitere Daten wie die dreidimensionale Darstellung von Winden oder eine Karte der globalen Zirkulationsströme in der Atmosphäre ableiten. PFS wird auch Spektren vom atmosphärischen Staub erstellen und nach seltenen Gasmolekülen von Kohlenmonoxid, Methan und Formaldehyd suchen. Vor allem Methan und Formaldehyd stehen in Verbindung mit der Bildung komplexerer organischer Moleküle und möglicherweise vorhandenem primitiven Leben.

Das Instrument erfasst die Absorptionsspektren von Molekülen in einem weiten Spektralbereich von 1,2 bis 45 µm. Hauptbestandteil von PFS ist ein Michelson-Interferometer mit Auswerteelektronik. Das einfallende Licht wird im Interferometer in zwei Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge geteilt und analysiert. Die gewonnenen Spektraldaten werden mittels eines gekühlten Detektors dann in ein elektrisches Signal umgesetzt. PFS kann 8000 Spektralkpunkte bei der kurzen Wellenlänge und 2000 bei der langen Wellenlänge unterscheiden.

Die großen Datenmengen können ohne weitere Verarbeitung nicht zur Erde übertragen werden. Deshalb erfolgt an Bord des Orbiters mittels Fast Fourier Transformation (FFT) die Berechnung der Spektren bei gleichzeitiger Reduktion der Datenmenge.

Auch PFS wurde zunächst für die Mars-96 Mission gebaut. Auf Mars Express kommt eine verbesserte Version des Reserveflugmodells zum Einsatz.

Principal Investigator: Dr. Vittorio Formisano, Instituto Fisica Spazio Interplanetario, Rom

7. SPICAM: UV and IR Atmospheric Spectrometer

Warum reagiert die Marsatmosphäre so aggressiv mit an der Oberfläche anstehenden Materialien? Das noch weitgehend unbekanntes Phänomen gab dem Roten Planeten seinen Beinamen: „Rost“. Die zwei Sensoren des Spektrometers werden deshalb die beiden Kandidaten – Ozon und UV-Strahlung – als Verursacher des aggressiven Verhaltens näher untersuchen. Im Verlauf der gesamten Mission soll so eine Übersicht über die Verteilung von Ozon und Wasserdampf gewonnen werden. Weitere Messungen betreffen die vertikale Verteilung von Ozon und CO₂ in der Atmosphäre und die räumliche Verteilung von Wasser auf dem Mars. Zusammen mit PFS und OMEGA sollen die Vorgänge an der nördlichen Polareiskappe geklärt werden. Im Sommer tritt dort Wasser aus dem Boden aus. Aber was geschieht mit ihm? Wandert es zur südlichen Eiskappe? Oder verschwindet es wieder im Boden?

Eine weitere Aufgabe ist die Messung geladener Ionen von CO und CO₂. Diese emittieren UV-Licht in einem Wellenlängenbereich von 200 bis 290 nm, das mit dem UV-Sensor erfasst werden kann. Auf diese Art kann später aus den Daten ein Bild der Ionosphäre erstellt werden.

SPICAM ermittelt dazu die Zusammensetzung der Atmosphäre mittels Absorptionsspektren, die durch die Absorption von Teilen des Sonnenlichtes durch Moleküle der Marsatmosphäre entstehen. Das Gerät besitzt dazu zwei Sensoren, einen für das UV-Licht (118 bis 320 nm) und einen für das IR-Licht (1 bis 1,7 µm). Der UV-Sensor kann in drei Modi arbeiten.

Im Nadir-Pointing-Modus erfasst der Sensor das von der Marsoberfläche reflektierte Licht. Im zweiten Modus, mit stellarer oder solarer Okkultation peilt SPICAM einen Stern oder die Sonne so an, dass deren Licht die Atmosphäre durchqueren muss und im dritten Modus misst der UV-Sensor das "Glühen" der Atmosphäre. Der IR-Sensor arbeitet nur im Nadir-Modus.

Bei SPICAM auf Mars Express handelt es sich um eine verbesserte Version des für Mars-96 entwickelten Instruments.

Principal Investigator: Dr. Jean-Loup Bertaux, Service d'Aeronomie, Verrieres-le-Buisson

Instrumente auf dem Lander Beagle-2

Der Lander wurde mit verschiedenen Instrumenten zur Analyse der Zusammensetzung und Struktur des Marsbodens ausgerüstet. Zwei Stereo-Kameras liefern Panorama-Aufnahmen der Umgebung und detaillierte Bilder der unmittelbaren Umgebung. Verschiedene Umweltsensoren nehmen vor allem atmosphärische Daten auf.

Beagle 2 ist für eine nominelle Lebensdauer von 6 Monaten ausgelegt. Da die Landemasse des Geräts nur 32 kg beträgt, wurden hohe Anforderungen an die Größe und das Gewicht der einzelnen Instrumente gestellt. Die Instrumente zur Erkundung der Marsoberfläche und seines Bodens sind:

Instrument

GAP (Gas Analysis Package)
Microscope
Panoramic Camera

Mole "PLUTO"
XRS (X-Ray Spectrometer)
Mössbauer Spectrometer

Verantwortliches Institut

Open University, Milton Keynes, GB
Max-Planck-Institut für Aeronomie, D
Mullard Space Science Lab
(University College London), GB
DLR, Köln, D
University of Leicester, GB
TU Darmstadt, D

1. Roboterarm

Der Roboterarm besitzt mit fünf Freiheitsgraden eine große Flexibilität und kann im Radius von 80 cm einen mit Werkzeugen und Experimenten ausgestatteten Träger (PAW) um den Lander herum führen. Ursprünglich sollte der Arm die einzelnen Instrumente den Proben zuführen. Das Risiko von Fehlbedienungen und damit der Zerstörung eines Instrumentes ist jedoch sehr hoch. Deshalb wurde die so genannte „PAW“-Workbench eingeführt.

2. Payload Adjustable Workbench PAW

Zur Erforschung des Marsbodens müssen Bodenproben genommen und analysiert werden. Die dafür benötigten Einrichtungen und Instrumente wurden auf einer Vorrichtung am Ende des Roboterarmes von Beagle zusammengefasst. Diese als PAW bezeichnete Halterung trägt die Geräte der meisten Experimente von Beagle 2: das Mikroskop, die beiden Spektrometer, das Grinder/Corer-Werkzeug und eine kleine Lampe zur Beleuchtung des Umfeldes.

Die Stereo-Kameras wurden weiter oben am Roboterarm angebracht.

3. Die Instrumente auf der PAW sowie dem Roboterarm

3.1 Kameras

Am Roboterarm sind zwei Kameras so befestigt, dass aus ihren Einzelaufnahmen auch dreidimensionale Bilder (Stereo-Bilder) erzeugt werden können. Sie liefern Panoramablicke vom Umfeld um den Lander und überwachen die Aktivitäten während der Entnahme von Bodenproben.

Eine Kamera wurde mit einem Spiegel ausgerüstet, so dass mit ihr die ersten Weitwinkelaufnahmen kurz nach der Landung übertragen werden können, ohne dass der Roboterarm bereits ausgefahren wurde. Später dient der Spiegel zur Beobachtung des PLUTO-Instrumentes, das auf effektive Art Bodenproben nimmt.

3.2 Der Maulwurf PLUTO - Planetary Underground Tool (“Mole”)

Das Instrument wurde im Rahmen des ESA-Technologieprogramms mit dem DLR-Institut für Raumsimulation Köln und VNIITransmasch St. Petersburg entwickelt. Der Planetenbohrer nimmt während der Mission bis zu drei Proben aus verschiedenen Tiefen und übergibt sie an das GAP-Instrument zur Analyse. Das GAP befindet sich nicht auf der PAW-Einheit, sondern ist in der Zentraleinheit im Lander untergebracht.

PLUTO liefert darüber hinaus Daten über den Festigkeitsverlauf des Bodens und damit über die Sedimentationsgeschichte des Materials. Ein am Eindringkörper angebrachter Temperatursensor übermittelt zudem Informationen über die thermischen Eigenschaften des Marsbodens.

Der kleine Maulwurf (englisch "mole") bohrt nicht im herkömmlichen Sinn. PLUTO arbeitet nach dem Verdrängungsprinzip. Dabei wird ein 0,28 m langer zylindrischer Eindringkörper mit Kegelspitze mittels eines internen Schlagmechanismus in granulare Böden getrieben. Dabei können je nach Beschaffenheit des Bodens Tiefen erreicht werden, die die Länge des Eindringlings um das Mehrfache übertreffen. Das 860 g schwere Gerät ist im verstaute Zustand 0,36 m lang. Damit ist PLUTO herkömmlichen Bohrsystemen weit überlegen.

3.3 Grinder/Corer

Bei dieser Schleif- und Bohrvorrichtung handelt es sich um ein kombiniertes Gerät. Mit ihm können sowohl verwitterte Oberflächen durch Abschleifen (ähnlich wie beim Zahnarzt) abgetragen als auch Bohrkern für Analysen gewonnen werden.

3.4 Mössbauer-Spektrometer

Das an der Universität Mainz hergestellte Mössbauer-Spektrometer ermittelt mit sehr hoher Genauigkeit die Zusammensetzung eisenhaltiger Mineralien und die magnetischen Eigenschaften von Oberflächenmaterial durch direkten Kontakt mit dem entsprechenden Probenmaterial. Da die

wichtigsten Mineralien auf dem Mars Eisen enthalten, können über den so genannten Mössbauer-Effekt sogar Informationen über die paläoklimatischen Bedingungen gewonnen werden. Der Effekt besagt, dass Gammastrahlung rückstoßfrei von Atomkernen emittiert und absorbiert wird. Damit kann die Kernresonanzfluoreszenz gemessen werden. Zur Anregung bombardiert eine radioaktive Quelle (Kobalt 57) die Probe mit Gammastrahlen. Die Spektraldaten der rückgestreuten Strahlung geben Auskunft über die mineralogischen Charakteristiken des gesammelten Gesteins. Im Fall des Mars mit seinem stark eisenhaltigen Gestein spielt die Mössbauer-Spektroskopie eine zentrale Rolle. Durch die Analyse des Oxidationszustandes der Oberfläche, der Natur der eisenhaltigen Mineralien und ihrer Verwitterungsprodukte kann vielleicht die Existenz und der Verbleib von Wasser auf dem Mars geklärt werden.

3.5 Das Röntgenstrahlen-Spektrometer XRS (X-Ray-Spectrometer)

Das Röntgenstrahlen-Spektrometer ermittelt das Alter der Gesteinsproben und den Gehalt wichtiger chemischer Elemente im Gestein. Dazu werden die Proben mit Röntgenstrahlen aus vier radioaktiven Quellen – zwei Eisen 55- und zwei Cadmium 109-Quellen – beschossen. Das so behandelte Material emittiert daraufhin Röntgenstrahlen niedrigerer Energie, deren Spektrum die Charakteristik der untersuchten Proben wiedergeben.

Das Alter der Steine wird zusammen mit Messungen des GAP-Instrumentes bestimmt. Aus dem Wissen, dass Kalium 40 in einem bestimmten Zeitraum zu Argon 40 zerfällt, kann durch die Ermittlung der Anteile der beiden Isotope das Alter des Gesteins ermittelt werden. Während XRS den Kaliumanteil misst, wird mit GAP das in den Steinen gebundene Argon ermittelt.

3.6 Das Mikroskop

Das Mikroskop, entwickelt vom Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg, untersucht die Textur Tausender nur Millimeter großer Gesteinskörner, die ihm vom Grinder geliefert werden. Daraus können die Wissenschaftler erkennen, ob diese von Sedimenten stammen oder vulkanischen Ursprungs sind.

Das elektronische Mikroskop hat als Aufnahme-Detektor ein CCD-Feld mit 1024 x 1024 Pixeln. Ein Beleuchtungssystem illuminiert die Proben in verschiedenen Farben. Zwölf LEDs leuchten in den Farben rot, grün und blau sowie im UV-Bereich. Mittels des UV-Lichts kann ermittelt werden, ob sich fluoreszierende Teilchen unter dem Probenmaterial befinden.

4. Instrumente des Landers

4.1 Gas Analysis Package GAP

Für GAP besteht die Hauptaufgabe in der Suche nach Leben sowie biologischer Prozesse auf dem Mars. Biologische Aktivitäten hätten nämlich chemische Spuren in Marsgestein sowie im Bodenmaterial hinterlassen: Einmal in Form so genannter Kerogene, komplexe organische Verbindungen aus dem Zerfall biologischen Materials, andererseits durch die Verschiebung der Verhältnisse stabiler Isotope von Kohlenstoff. Denn jedes Leben auf der Erde bevorzugt das leichtere ^{12}C -Isotop gegenüber ^{13}C .

GAP erkennt nun organisches Material daran, dass Kohlendioxid bei recht geringer Temperatur aus der Probe bei deren Oxidation im GAP-Instrument freigesetzt wird. Wenn sich die $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Verhältnisse aus unterschiedlichen Reservoirs zudem deutlich voneinander unterscheiden, kann man daraus schließen, dass der organische Kohlenstoff durch biologische Prozesse deponiert wurde. Die Proben zur Untersuchung im GAP liefert PLUTO aus tieferen Schichten der Marsoberfläche.

GAP besteht aus verschiedenen Komponenten: einer Einrichtung zur Erhitzung der Gesteinsproben, einem Gasentnahmesystem und einem Massenspektrometer. Die bei der stufenweisen Erhitzung entstehenden Gase werden zum Massenspektrometer geleitet und dort das Verhältnis der beiden Kohlenstoff-Isotope ermittelt. Mit GAP können auch andere Gase analysiert werden.

4.2 Umweltsensoren

An Bord von Beagle 2 befinden sich sieben verschiedenartige Sensoren zur Erfassung atmosphärischer Eigenschaften und energetischer Quellen:

- Ein UV-Sensor, der im Bereich von 200 bis 400 nm die oberflächennahe UV-Strahlung ermittelt.
- MAOS, eine Sensor zur Identifizierung von Spezies in der Atmosphäre, die Sauerstoff verbrauchen.

- Ein Strahlungssensor zur Messung des solaren Protonenstromes und der energiereichen kosmischen Strahlung
- Ein Sensor zur präzisen Ermittlung der Lufttemperatur mit einer Genauigkeit +/- 0,5 K
- Ein Drucksensor, welcher sowohl am Mars-Tag als auch in der -Nacht den Luftdruck mit einer Genauigkeit von 0,1 mb misst
- Ein Windrichtungsanzeiger, der Richtung und Geschwindigkeit lokaler Winde in zwei orthogonalen Richtungen aufzeichnet
- Ein Staubdetektor, der die Staubrater, die Richtung und die Dynamik von Staubbewegungen in der Atmosphäre registriert