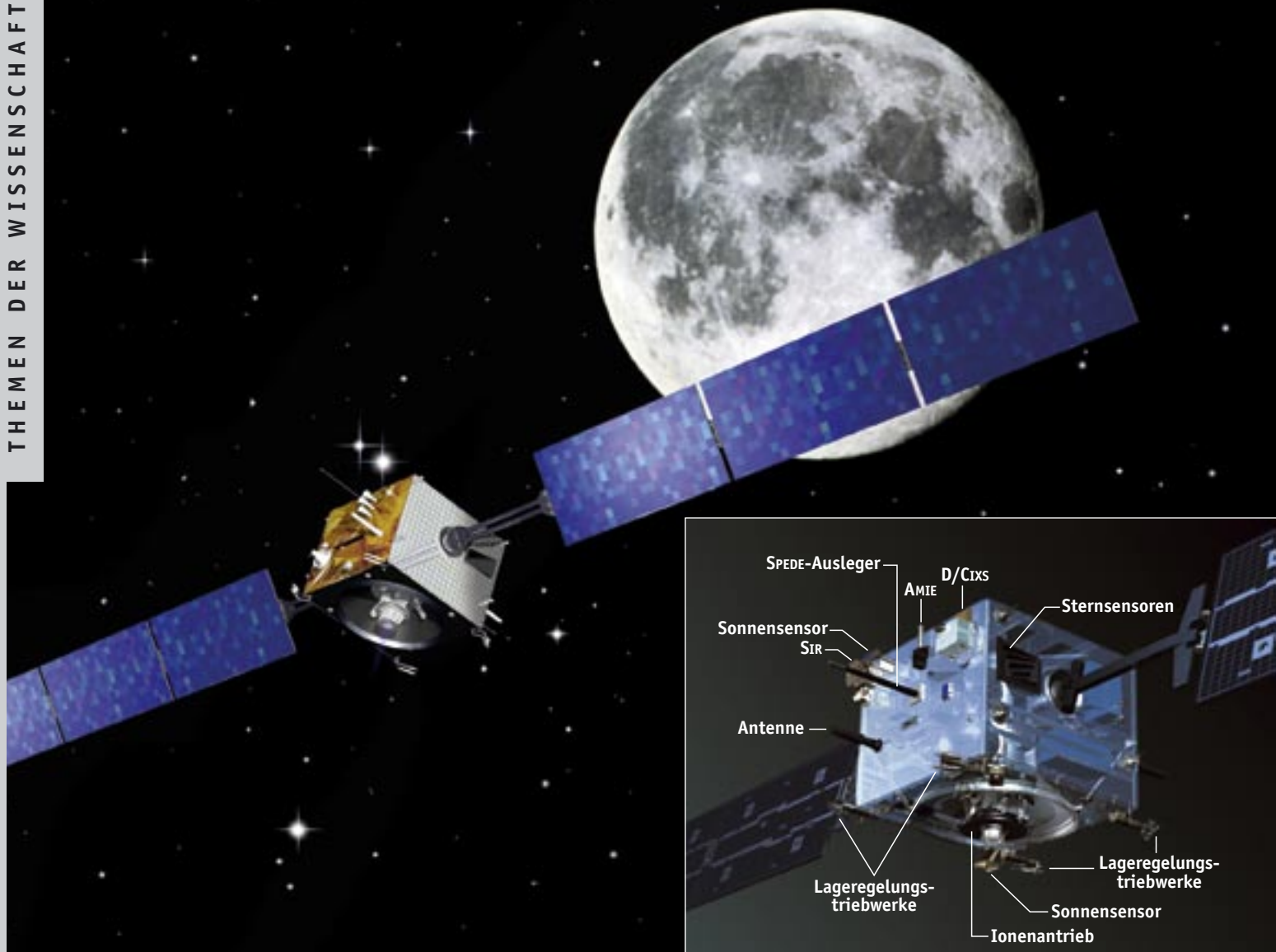




SMART-1: Die erste europäische Mondsonde

VON OCTAVIO CAMINO RAMOS UND MICHAEL KHAN

Am 28. September 2003 wurde die europäische Mondsonde SMART-1 als Beifracht mit einer ARIANE-5-Trägerrakete ins All gebracht. Ende 2004 erreichte die Sonde nach vielen Erdumläufen schließlich eine Umlaufbahn um den Erdtrabanten und übermittelt seit Dezember 2004 Bilder und Messdaten aus der Mondumlaufbahn.

SMART-1 ist die erste Raumsonde der Europäischen Weltraumagentur ESA zum Mond und weist auf das wachsende wissenschaftliche Interesse an unserem natürlichen Trabanten hin. Kurz nach dem Aussetzen, nur 42 Minuten nach dem Abheben der ARIANE-5 vom europäischen Weltraumbahnhof Kourou in Französisch Guyana, wurde von SMART-1 die erste Telemetrie

von der Bodenstation der ESA in Perth, Westaustralien, empfangen. Nun begann die Inbetriebnahme der Sonde mit dem Ausfahren der Solargeneratoren.

Die Missionsziele

SMART steht für »*Small Missions for Advanced Research and Technology*«. Die SMART-Missionen unterscheiden sich von den üblicherweise wissenschaftlich gepräg-

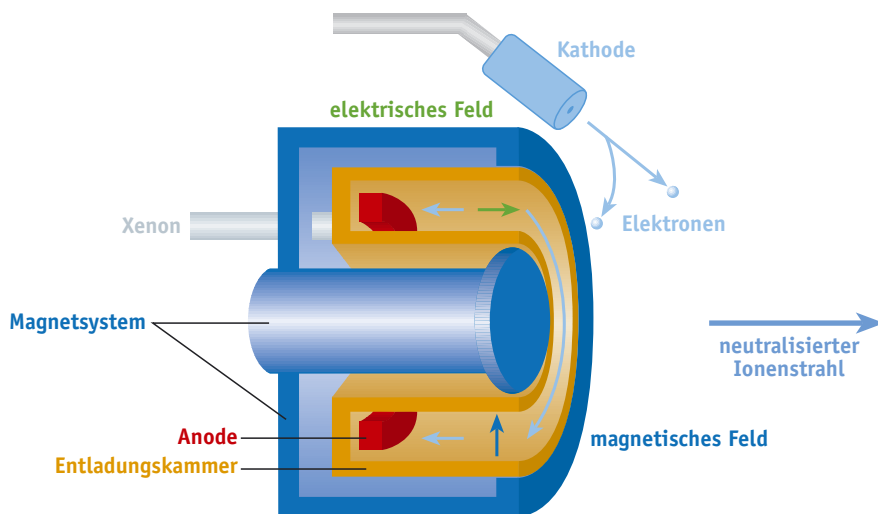
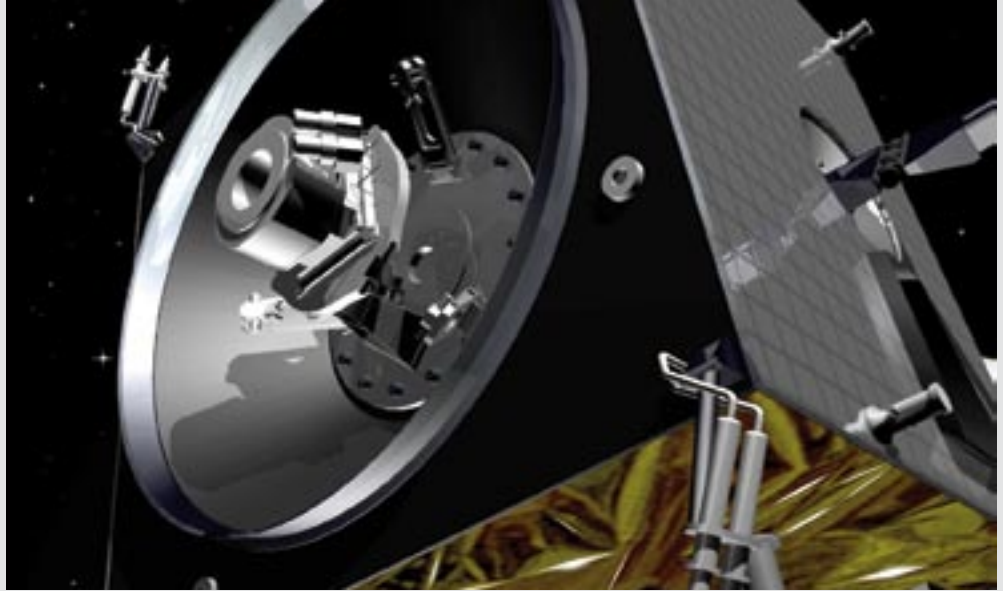
ten Projekten der ESA; sie dienen vor allem der Demonstration und der Sammlung von Erfahrungen mit neuen Technologien. Im Fall von SMART-1, der ersten derartigen Mission, handelt es sich dabei um ein elektrisch betriebenes Ionenantriebswerk, um Kommunikation im Ka-Band und via Laser und um optische Navigation. Auch die Missionsplanung, die Bahnbestimmung und der Betrieb sind bei Anwendung dieser Technologien anders als bei herkömmlichen Raumsonden.

SMART-1 ist nicht die erste interplanetare Raumsonde mit einem elektrischen Hauptantrieb; nach der amerikanischen Kometenmission DEEP SPACE 1 und der japanischen Asteroidenmission HAYABU-

◀ Abb. 1: Die Raumsonde SMART-1 vor dem Mond. Inset: Durchsichtsskizze der Sonde SMART-1. (Bild: ESA)

▶ Abb. 2: Das Triebwerk von SMART-1 im eingebauten Zustand. (Bild: ESA)

▼ Abb. 3: Schematische Darstellung des stationären Plasma-triebwerks von SMART-1. (Bild: ESA/SuW)



auf vier Kilometer pro Sekunde zu beschleunigen. In der Himmelsmechanik ist alles jedoch etwas komplizierter, so dass dieser Wert nicht den realen Geschwindigkeitszuwachs darstellt.

Die wissenschaftlichen Instrumente

Obwohl es sich bei SMART-1 primär um einen Technologiedemonstrator handelt, gab man ihm doch ein Paket von wissenschaftlichen Instrumenten mit. Die Gesamtmasse der Instrumente beträgt weniger als 19 Kilogramm. Zunächst sind da die Instrumente zu nennen, welche dem Test der neuen Technologien dienen und die dazu erforderlichen Messungen vornehmen.

Andere Instrumente dienen primär der Mondforschung, sie erweitern unser Wissen über die Mondentstehung und -evolution, die lunare Oberflächenphysik und die chemische Zusammensetzung der Kruste. Bei allen Instrumenten stand die Miniaturisierung im Vordergrund, der die Entwickler zwang, technologisch neue Wege zu gehen.

Die Kamera AMIE (*Advanced Moon micro-Imager Experiment*) gestattet mit einem Sichtfeld von 5,3 Grad und einem CCD-Sensor mit (1024×1024) Pixeln aus einer Höhe von 300 Kilometern Aufnahmen im sichtbaren Licht mit einer Auflösung von besser als 30 Meter pro Pixel. AMIE unterstützt auch ein Experiment zum Datenaustausch mit der Erde über eine irdische Laser-Station, ferner werden AMIE-Bilder für Versuche zur optischen Navigation verwendet. AMIE wiegt nur zwei Kilogramm.

Das in Deutschland vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau entwickelte Infrarot-Spektrometer SIR untersucht die beleuchtete Oberfläche im Bereich von 900 bis 2400 Nanometer spektroskopisch und bestimmt dabei die chemische Zusammensetzung der Gesteine.

SA ist sie die dritte weltweit. Allerdings ist SMART-1 die erste ESA-Raumsonde mit einem derartigen Antrieb, und auch die erste Mission, bei der diese Art von Bahn zum Mond geflogen wurde. Somit gewinnt die ESA wichtige Erfahrungen, die späteren Projekten, insbesondere im Hinblick auf die geplante Mission BEPI-COLOMBO zum Planeten Merkur, zugute kommen.

Die Raumsonde und ihr Antrieb

SMART-1 wurde im Auftrag der ESA von der schwedischen Firma SSC als Hauptauftragnehmer entwickelt und gebaut, wobei Komponenten aus ganz Europa zum Einsatz kamen.

Da das enge Missionsbudget und die Anforderungen des Co-Passagierstatus beim ARIANE-Start die Masse und die Dimensionen limitierten, fiel SMART-1 notgedrungen leicht und klein aus (siehe Abb. 1). Der Hauptkörper ist etwa ein Kubikmeter groß. Mit einer Spannweite von 14 Metern und einer Fläche von zehn Quadratmetern sind die Solargeneratoren auffallend groß. Ihre hohe Nennleistung von 1,85 Kilowatt (der großen Saturnsonde CASSINI steht nur knapp die Hälfte zur Verfügung) wird

benötigt, um den elektrischen Antrieb zu versorgen.

Die meisten Ionentriebwerke sind nach der »Gridded-ion-thruster«-Bauart konzipiert: Dort werden Ionen des Edelgases Xenon auf eine gitterförmige Kathode hin beschleunigt und mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen. Zwar ist der Schub schwach, aber wegen der hohen Ausstoßgeschwindigkeit sind solche Triebwerke effizient.

Das SMART-1-Triebwerk (Abb. 2), ein so genanntes stationäres Plasmatriebwerk, ist anders aufgebaut: In einer ringförmigen Kammer (siehe Abb. 3) werden die eingespeisten Elektronen in einem radialen Magnetfeld in einer Zyklotronbewegung gefangen. Sie kollidieren mit Atomen des ebenfalls eingespeisten Treibstoffs Xenon, die dabei ionisiert werden. Das durch den Hall-Effekt entstehende axiale elektrische Feld beschleunigt die erzeugten Ionen, welche mit einer für Ionentriebwerke moderaten Geschwindigkeit von 16 Kilometer pro Sekunde ausgestoßen werden. Dies liefert etwa 0,07 Newton Schub, entsprechend dem Gewicht einer Postkarte.

Der Xenontank fasst 82 Kilogramm, was theoretisch ausreicht, um die Sonde

► Abb. 4: Oben- und Seitenansicht der Transferbahn von SMART-1 zum Mond (Bild: ESA/SuW)

Es handelt sich um das erste Infrarot-Spektrometer im Mondorbit.

Das Röntgen-Spektrometer D-CIXS (in Verbindung mit dem solaren Röntgen-Monitor XSM) kartiert mit einem Sichtfeld von $12^\circ \times 32^\circ$ über Röntgenfluoreszenzmessungen die globale Verteilung der gesteinsbildenden Elemente in der Kruste (Magnesium, Silizium, Aluminium, Sauerstoff und Eisen) mit einer Auflösung von 50 Kilometern. Dies ist die erste Kartierung der Mondoberfläche seit den APOLLO-Missionen, welche jedoch nur die Äquatorregionen untersuchten.

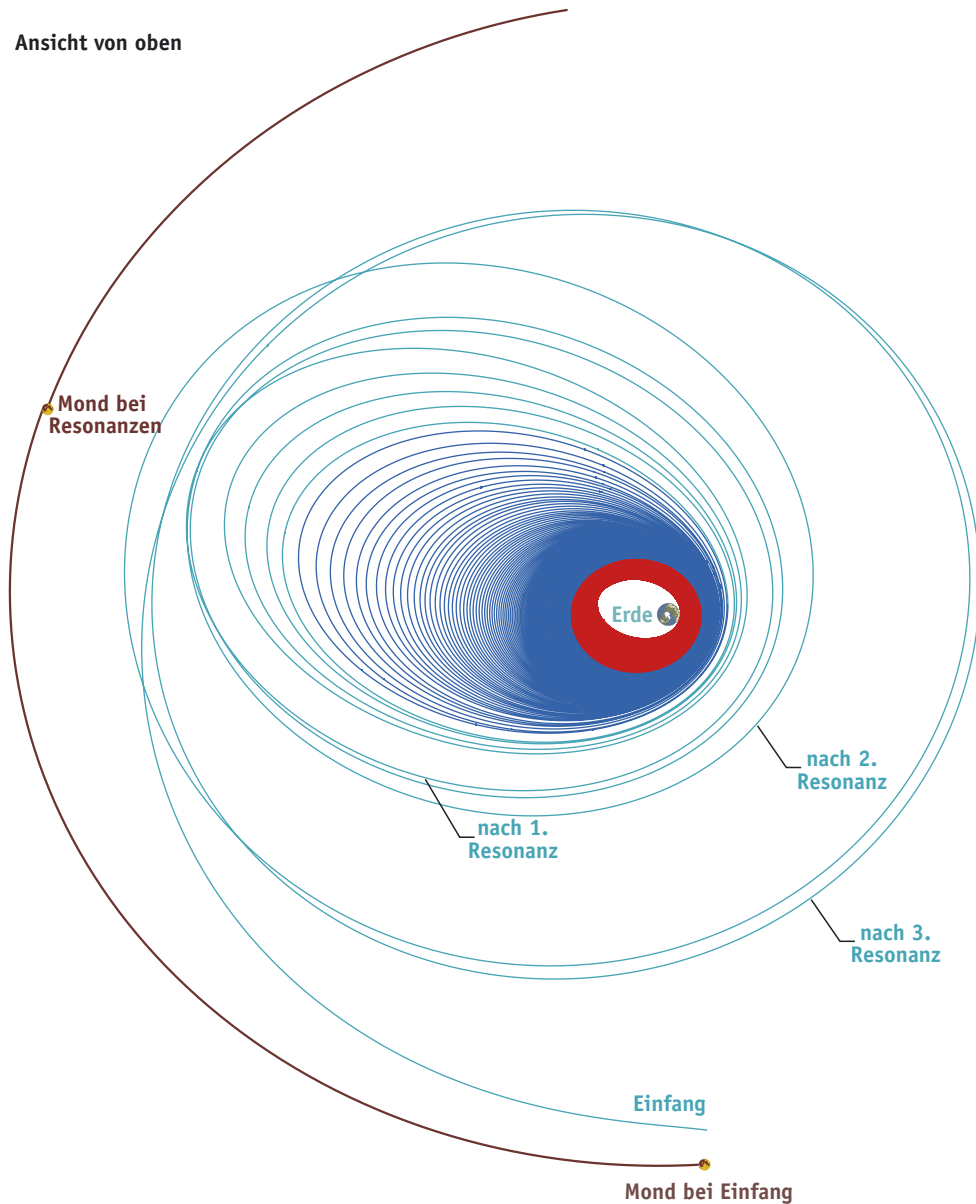
Der Transfer zum Mond

Vom Aussetzen durch die ARIANE-Rakete bis zum Erreichen der Umlaufbahn um den Mond verstrichen fast 14 Monate. Heraus kam eine der vielleicht komplexesten Bahnen der Raumfahrtgeschichte (siehe Abb. 4). Es dient der Verständlichkeit, die Bahn in Phasen zu unterteilen. Die Anfangsbahn lag nahe der Äquatorebene. Ihr erdnächster Punkt (Perigäum) hatte eine Höhe von 650 Kilometer, der erdfernste (Apogäum) fast 36000 Kilometer. SMART-1 durchquerte auf dieser Bahn mit jedem Umlauf die Strahlungsgürtel der Erde, was die Solargeneratoren und Bordelektronik schädigte.

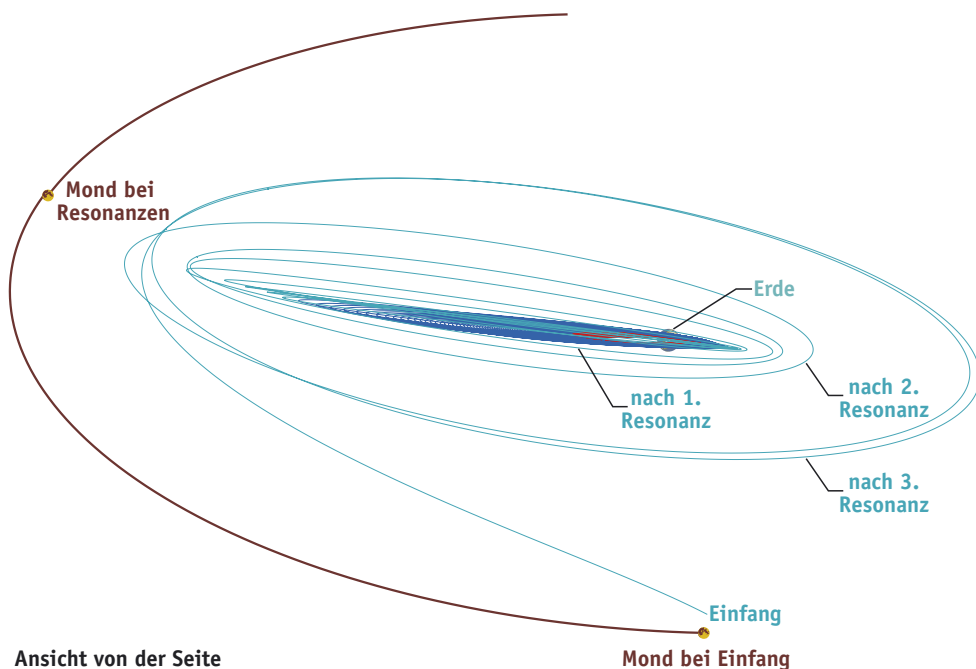
Der Ausweg war, das Perigäum auf über 13000 Kilometer anzuheben. Dazu wurde so bald wie möglich das Triebwerk in Betrieb genommen. Es sollte, so der Plan, mehr als 80 Tage lang mit seinem sanften Schub die Sonde langsam, aber konstant (bis auf die Erdschattendurchgänge) beschleunigen und so seine Bahn allmählich anheben. Dies kostete 29 Prozent des Xenon-Treibstoffvorrats. Tatsächlich dauerte diese Phase fast 100 Tage, bis zum 7. Januar 2004. Die Solarzellen litten jedoch weniger als befürchtet: Sie verloren nur acht Prozent ihrer Leistungsfähigkeit, so dass im weiteren Verlauf mehr Leistung und damit mehr Schub als erwartet zur Verfügung stand.

Nach der Flucht aus den Strahlungsgürteln begann die zweite Phase. Nun wurde durch geeignete Schubphasen mit dem Triebwerk das Apogäum immer weiter hinausgeschoben und gleichzeitig die Bahn gedreht, um ihre Neigung derjenigen der Mondumlaufbahn anzupassen. So konnte man auf den Mond »zielen«, und zu lange Durchgänge durch den Erdschatten und damit eine Tiefentladung der Batterien vermeiden. Diese Phase dauerte bis zum 19. August 2004

Ansicht von oben



- Phase 1: Perigäumsanhebung
- Phase 2: Apogäumsanhebung
- Phase 3: Mondresonanzen



und kostete weitere 30 Prozent des Treibstoffvorrats.

Danach war das Apogäum so hoch, dass es der Bahn des Mondes nahe kam. Man legte den Durchlauf der Sonde an diesem Punkt so, dass der Mond dann gerade in der Nähe war und durch seine Schwerkraft die Bahn von SMART-1 stark beeinflusste. Durch wiederholtes, genaues Abpassen des Zeitpunkts und der Geometrie der Begegnung konnte die erwünschte Bahnänderung mit dem Ziel einer maximalen Einsparung von Treibstoff und Zeit bis zum Erreichen der Bahn um den Mond optimiert werden.

Der Übergang in die Bahn um den Mond erfolgte ganz anders als bei »klassischen« Raumfahrzeugen. Da das Triebwerk nur einen schwachen Schub liefert, konnte man nicht einfach dicht heranfliegen und dann mit einem kurzen Bremsmanöver in eine Umlaufbahn um den Erdrabanten einschwenken.

Es existiert eine Zone zwischen Erde und Mond, etwa 55000 Kilometer vom Mond entfernt, in welcher die Anziehungskräfte von Erde und Mond sich einander ausgleichen. Ein Körper, der sich dort befindet, braucht nur einen kleinen Schubs, um in die eine oder andere Richtung zu »fallen«. SMART-1 wurde nun mit geringer Geschwindigkeit in diese Zone manövriert. Dazu musste die Sonde – als Resultat aller vorherigen Manöver – sich bereits auf einer Bahn befinden, die derjenigen des Mondes nicht mehr allzu unähnlich war.

Es funktioniert: SMART-1 glitt wie vorausgerechnet durch dieses »Schwerkraft-Niemandsland« und war ab dem 16. November 2004 in einer Bahn um den Mond. Anfangs war diese Bahn noch sehr ausgedehnt und instabil, die Sonde wäre bald wieder von der Erde dem Mond entrissen worden. Daher benutzte man das Triebwerk von nun an zum Bremsen, was in der Raumfahrt den Übergang in eine engere Bahn bedeutet. Der Abbremsvorgang wurde Ende Februar abgeschlossen: Die Sonde hatte die Bahn erreicht, die den Anfang der ersten wissenschaftlichen Phase markierte.

Die wissenschaftliche Phase

Die Bahn von SMART-1 um den Mond ist polar – sie überquert beide Pole des Mondes. Besonderes Interesse gilt dem Aitken-Einschlagsbecken am Südpol. Dieses Einschlagsbecken – übrigens die größte derartige Formation im Sonnensystem – enthält tiefe Krater, deren Böden in ewiger Dunkelheit und Kälte liegen und die deswegen Wassereis enthalten könnten. Es werden dort aber auch Berge vermutet, deren Gipfel konstant im Sonnenlicht

liegen. Somit würde sich die Südpolarregion hervorragend für eine bemannte Mondbasis eignen.

Die ursprüngliche Missionsplanung sah vor, dass SMART-1 in einer weiten Bahn mit einer Umlaufdauer von 14,5 Stunden sechs Monate lang den Mond umrunden sollte. Da jedoch der Transfer weniger Treibstoff verbrauchte als erwartet, konnte eine wesentlich tiefere Umlaufbahn anvisiert werden.

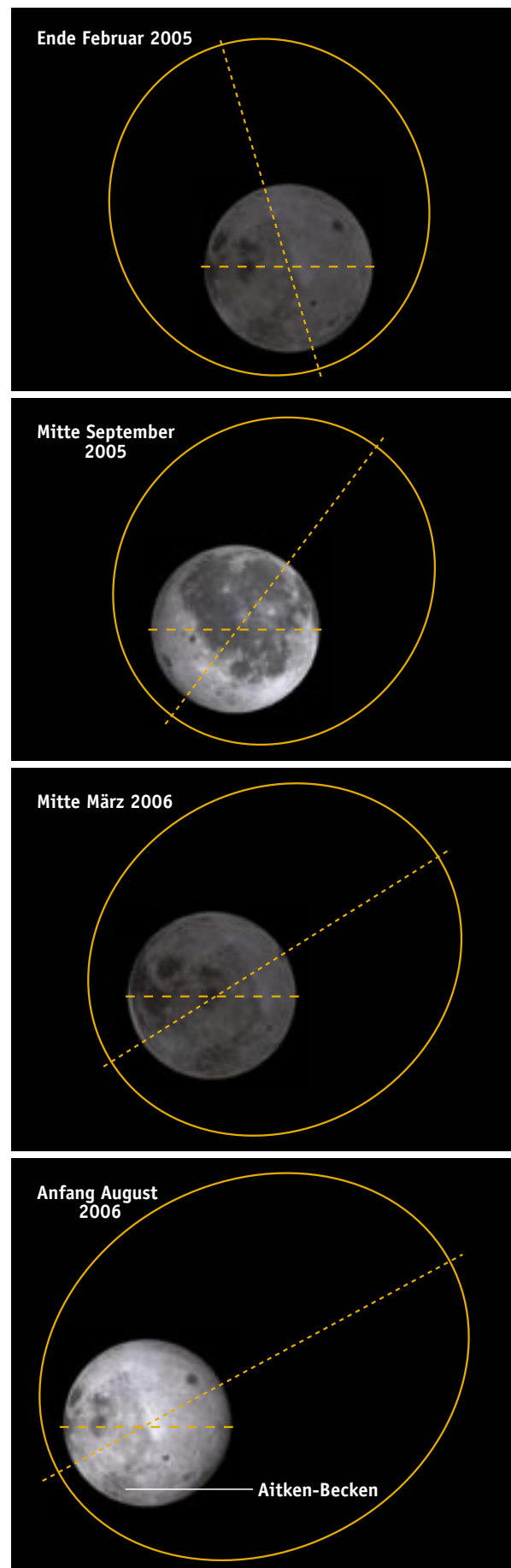
Die Bahn zu Beginn der wissenschaftlichen Phase weist eine Umlaufdauer von fünf Stunden auf (siehe Abb.5). Sie ist exzentrisch: Der mondnaheste Punkt, das Periselenium, ist weniger als 500 Kilometer hoch, der mondfernste Punkt, das Aposelenium, liegt bei knapp 2900 Kilometern. Die Schwerkraft von Erde und Sonne sowie das inhomogene Schwerfeld des Mondes stören diese Bahn erheblich: Die Exzentrizität nimmt erst ab, dann wieder zu, so dass das Periselenium sich erst hebt, und dann senkt – am Ende bis hinunter zur Oberfläche.

Gleichzeitig drehen die Störkräfte die Apsidenlinie, die Verbindungslinie zwischen Peri- und Aposelenium. Die Anfangsparameter sind so gewählt, dass sich das Periselenium (in dem wegen der geringeren Höhe die besten Beobachtungsbedingungen herrschen) während der ersten Monate der wissenschaftlichen Phase über den Südpol hinweg bewegt.

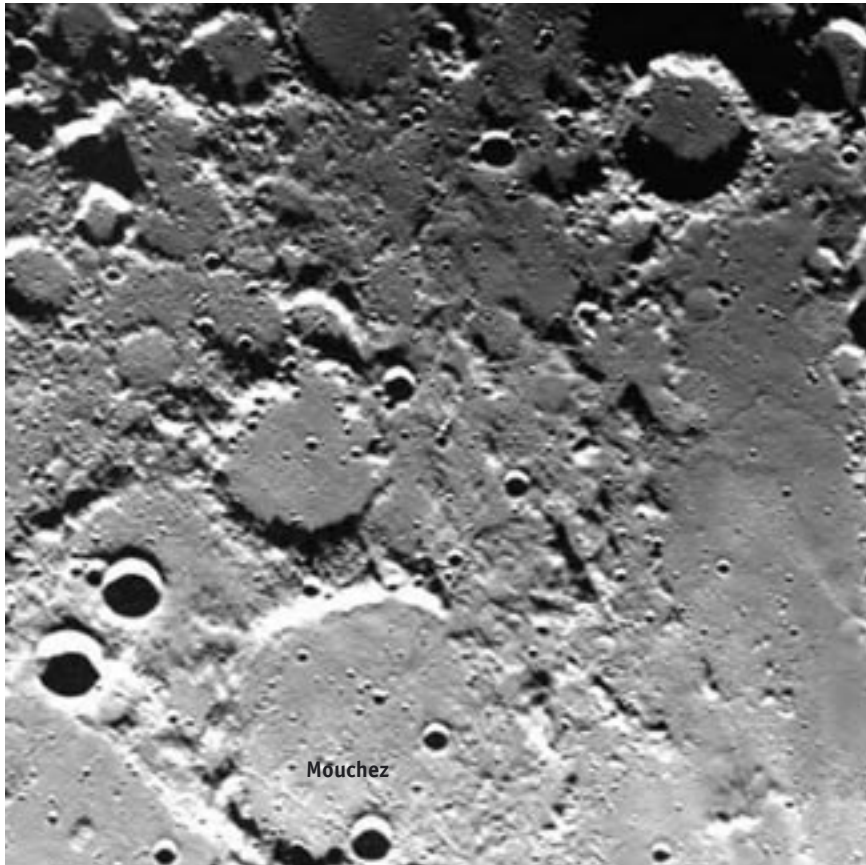
Im September 2005 wird das Periselenium bereits wieder so weit absinken, dass das Triebwerk wieder benötigt wird, um es auf über 1000 Kilometer anzuheben. Die Periseleniumshöhe nimmt nach dem Anheben wieder konstant ab. Die Periseleniumsposition driftet dabei immer weiter auf den Äquator zu, so dass jetzt der Schwerpunkt auf der Kartierung anderer Oberflächenregionen liegt.

Im April 2006 ist eine weitere Anhebung fällig, nach der äquatornahe Regionen kartiert werden können. Damit wird jedoch der Xenon-Treibstoff aufgebraucht sein, so dass SMART-1 etwa Anfang September 2006, nach immerhin fast zwei Jahren im Mondorbit, auf der Oberfläche aufschlägt. Sollte noch etwas Xenon vorhanden sein, kann der Absturz etwas hinausgezögert werden.

Bis zum Absturz wird SMART-1 nicht nur die Südpolarregionen, sondern die Mondoberfläche bis zu einer Breite von 30 Grad Nord aus Höhen von weniger als 800 Kilometer untersucht haben. Das betrifft selbstverständlich auch die erdabgewandte Seite. Wenn man auch die Beobachtungen aus größeren Höhen einbezieht, wird sogar die gesamte Oberfläche untersucht, wobei bei hohen nördlichen Breiten allerdings Abstriche bei der räumlichen Auflösung hinzunehmen sind.

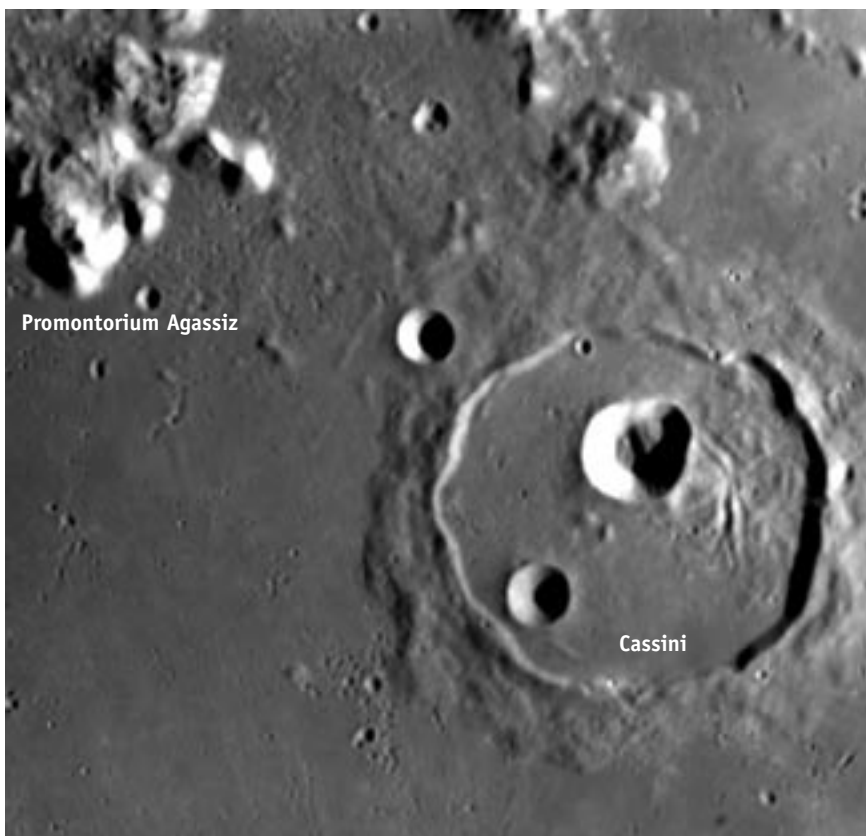


▲ Abb. 5: Die Entwicklung der polaren Bahn von SMART-1 um den Mond während der wissenschaftlichen Phase. (Bild: ESA/SuW)



▲ Abb. 6: Der Krater Mouchez (27° W, 78° N, 82 km Durchmesser), aufgenommen am 29. 12. 2004 mit der AMIE-Kamera an Bord von SMART-1. Norden ist oben. (Beide Bilder: ESA/Space-X Space Exploration Institute)

▼ Abb. 7: Der Krater Cassini im Mare Imbrium (4° W, 40° N, Durchmesser 56 km), aufgenommen am 19. Januar 2005 mit der AMIE-Kamera. Im Nordwesten ist das Promontorium Agassiz der Alpes Montes sichtbar.



Erfahrungen im Betrieb

Ohne Geld gestaltet sich der Alltag schwieriger. Dies gilt auch beim Satellitenbetrieb, der bei SMART-1 von vornherein harten Bedingungen ausgesetzt war. Das geringe Missionsbudget schränkte die Verfügbarkeit von Bodenstationen ein, so dass vorgesehen war, dass die Bodenkontrolle nur rund alle fünf Tage Telemetrie empfangen und Kommandos senden konnte. SMART-1 musste also imstande sein, sich über mehrere Tage hinweg selbstständig zu steuern.

Dies war die Hauptanforderung an den Bordcomputer und seinen Funktionsumfang. Keine einfache Sache, weil die Sonde auf ihrer Spiralbahn unter Ionenantrieb fast ununterbrochen eine präzise und komplexe Rollbewegung zu absolvieren hatte. SMART-1 konnte nicht einfach, wie andere Raumfahrzeuge, weitgehend unbeweglich oder zur Sonne ausgerichtet werden.

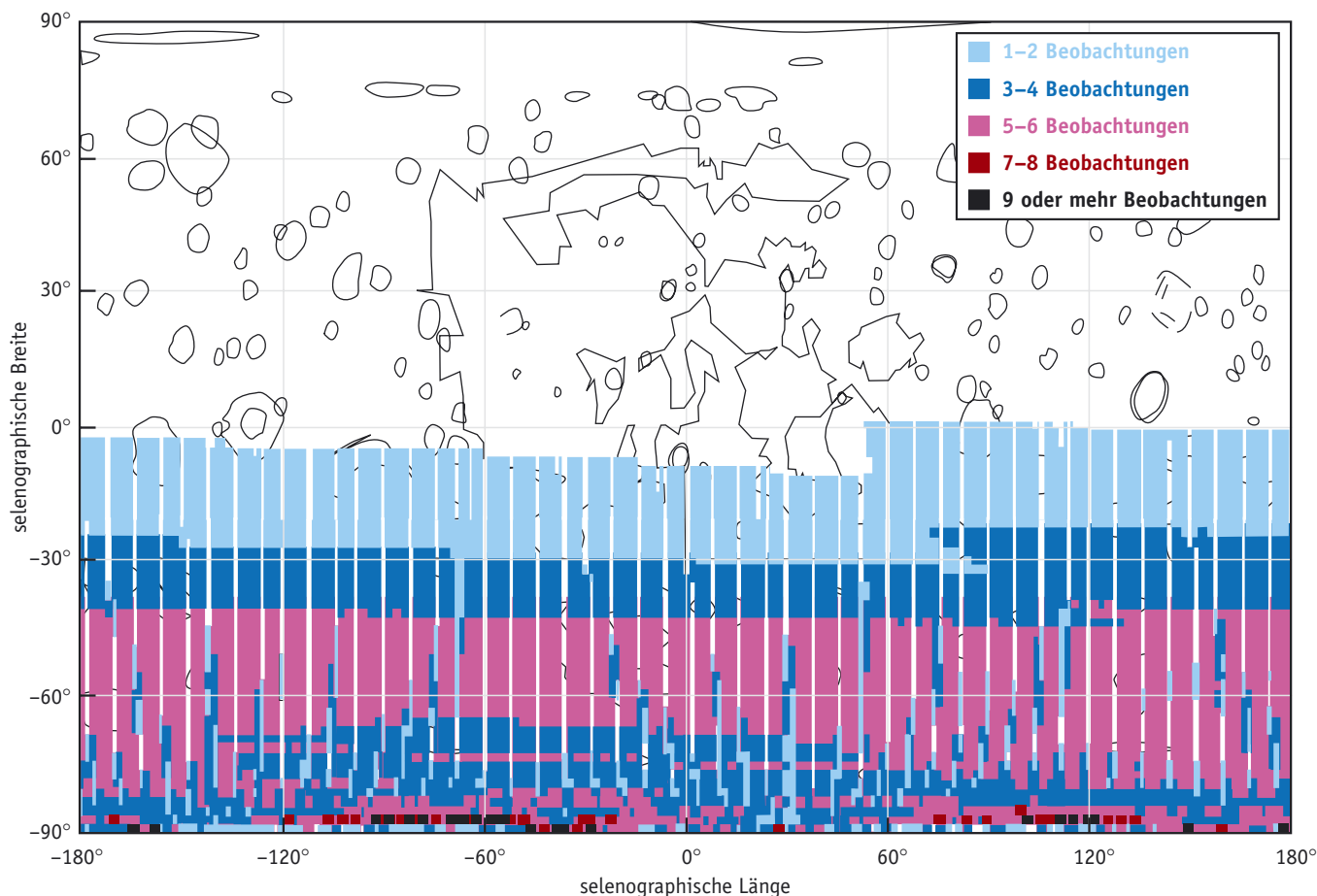
Erschwerend kam hinzu, dass SMART-1 schon im Monat nach seinem Start mit widrigen Umweltbedingungen zu kämpfen hatte. Im Oktober überschüttete einer der schwersten je beobachteten Sonnenstürme die Erde mit einem gewaltigen Strom geladener Teilchen. Diese wurden großenteils vom irdischen Magnetfeld gefangen – genau darum handelt es sich bei den van-Allen-Gürteln, die SMART-1 bei jedem Bahnumlauf durchqueren musste. Die Strahlenbelastung durch die dort plötzlich um Größenordnungen gestiegene Teilchenstrahlung hatte unerwünschte Auswirkungen.

■ Das Bombardement geladener Teilchen ließ elektronische Komponenten aller Art wie Speicherelemente, CCDs, Prozessoren und Solarzellen altern.

■ Durch den Strahlenbeschuss fielen auch zeitweise die Sternsensoren aus, die für die Lageorientierung unerlässlich sind. Eine Raumsonde, die orientierungslos wird, schaltet den Antrieb ab, dreht sich zur Sonne und wartet ab.

■ Außerdem sorgte die Strahlung für Datenfehler in der Steuerelektronik des Triebwerks, die eine Notabschaltung auslösten, obwohl das Triebwerk problemlos funktionierte.

Die beiden letzten Effekte verschärften das Problem der Strahlenbelastung, denn sie führten dazu, dass sich die Anhebung des Perigäums um Wochen verzögerte. Zunächst musste das Problem verstanden werden, dann musste eine Lösung gefunden und umgesetzt werden. In beiden Fällen bestand diese aus Softwareänderungen. Zum Glück fiel, wie erwähnt, die Degradation der Solarzellen geringer aus als befürchtet. Der weitere Betrieb verlief weitgehend störungsfrei,



▲ Abb. 8: Beobachtungsmöglichkeiten der beleuchteten Mondoberfläche aus niedrigen Höhen. (Bild: ESA/SuW)

er blieb aber weiterhin wesentlich komplexer als bei vergleichbaren Missionen dieser Größe.

Eine besondere Herausforderung war auch die Navigation der Sonde. Aus Messungen der Signallaufzeiten und der Dopplerverschiebung der Signale wurde nicht nur die aktuelle Bahn der Sonde bestimmt, die Berechnungen erlaubten auch einen Rückschluss auf den gelieferten Triebwerksschub. Bei herkömmlichen Sonden wird eine Referenzbahn definiert und weitgehend eingehalten. Wenn jedoch aufgrund einer Triebwerksabschaltung die tatsächliche Bahn erheblich von der geplanten abwich, fiel bei SMART-1 eine komplette Neuberechnung der Schubstrategie an.

Für die kleine SMART-1-Mannschaft im Kontrollzentrum der ESA, das ESOC in Darmstadt, ging damit ein erheblicher Aufwand einher, aber mit jedem gelösten Problem wuchs dort die Erfahrung. Am Ende gelang es trotz der unerwarteten Anlaufprobleme, nicht nur die Transferdauer zum Mond zu verkürzen, sondern auch eine vorteilhaftere Endbahn zu erzielen und die wissenschaftliche Phase von sechs auf mehr als 17 Monate zu strecken.

Erste wissenschaftliche Ergebnisse

Wir stehen zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Artikels am Beginn der wissenschaftlichen Phase und es liegen erste Ergebnisse vor. Die Auswertung der wissenschaftlichen Daten obliegt, wie bei Missionen der ESA üblich, den externen wissenschaftlichen Instituten, welche die Experimente entwickelt und gebaut haben. Diese sind auch im Besitz der Veröffentlichungsrechte – selbst die ESA kann Material nur publizieren, wenn es von diesen externen Stellen freigegeben wurde.

Mittlerweile wurde die gesamte Mondoberfläche bereits grob kartiert. Abb. 6 zeigt den Krater Mouchez, aufgenommen am 29. Dezember 2004, noch aus einer Bahnhöhe von über 5000 Kilometern. In Abb. 7 ist der Krater Cassini im Mare Imbrium zu sehen, aufgenommen am 19. Januar 2005 aus 3000 Kilometern Höhe. Die Kartierung der Südhalbkugel bis zum Sommer 2005 wird aus 300 Kilometer bis 800 Kilometer Höhe und deswegen mit bis zu zehnfach höherer Auflösung erfolgen.

Aus Abb. 8 geht die Abdeckung der südlichen Mondhemisphäre mit der Anzahl der optischen Beobachtungschancen aus Höhen von weniger als 800 Kilometern und guter Beleuchtung hervor. Für die ersten sechs Monate der wissenschaftlichen Phase betrifft dies bereits fast die gesamte Südhalbkugel.

Das Infrarotspektrometer SIR wird wegen seines engen Sichtfelds von nur knapp 3,5 Bogenminuten und der hohen Anforderungen an die Beleuchtungsverhältnisse in dieser Zeit nur wenige Prozent der Oberfläche untersuchen können.

Für das Röntgenspektrometer D-CIXS wird erwartet, dass in dieser Periode Fluoreszenzkarten für die Elemente Magnesium, Silizium und Aluminium mit einer Auflösung von 60 Kilometern von mindestens 50 Prozent der Südhalbkugel erstellt werden können.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse hoffen wir zu einem späteren Zeitpunkt in einem weiteren Artikel präsentieren zu können. □



Die Autoren arbeiten in Darmstadt beim Europäischen Weltraumoperationszentrum Esoc der Europäischen Weltraumagentur Esa. Der Spanier **Octavio Camino Ramos** ist Spacecraft Operations Manager der Mission SMART-1. Sein deutscher Kollege **Michael Khan** ist Missionsanalytiker.