

Die Vorgeschichte

Cassini wurde in den frühen achtziger Jahren kurz nach den bahnbrechenden Erfolgen der Voyager-Missionen 1980 und 81 angedacht. Die Mission wurde 1983 vom »Solar System Exploration Committee« in der Studie »Planetary Exploration through the Year 2000 – A Core Program« vorgestellt. In dieser Studie wurden vier Planetenmissionen höchster Priorität präsentiert, darunter befand sich ein »Saturn Orbiter/Titan Probe (SOTP)«-Projekt. Drei der vier Missionen wurden schließlich verwirklicht und wurden zu Magellan, dem unglücklich gescheiterten Mars Observer und eben Cassini.

SOTP sollte die erste Raumsonde des Mariner-Mark-II-Programms werden, einer Raumsondenserie zur Erkundung des äußeren Sonnensystems. Das besondere an dieser Serie war die geplante Schaffung von Standardmodulen für Antrieb, Instrumentenplattformen und tragende Strukturen. Diese Module sollten je nach Aufgabenstellung zu individuell verschiedenen, leistungsfähigen Raumsonden zusammengestellt werden. Man erhoffte sich vom modularen Aufbau deutliche finanzielle Einsparungen. Bei der Entwicklung dieser Module sollte soweit wie möglich auf das beim Bau der Voyager- und Galileo-Raumsonden ge-

Cassini-Huygens

Die Erforschung des Saturnsystems

von Tilmann Althaus

Am 6. Oktober 1997 soll vom Raumfahrtzentrum auf Cape Canaveral eine Titan-IVB-Centaur-Rakete mit der Raumsonde Cassini an Bord auf ihren 3.9 Milliarden km langen Weg zum Planeten Saturn starten. Cassini wird am 1. Juli 2004 in eine Umlaufbahn um den Saturn eintreten und für mindestens vier Jahre den Ringplaneten und seine Monde erkunden. Cassini ist die größte und schwerste jemals von den USA gebaute Planeten-sonde und in gewisser Weise die letzte ihrer Art.

wonnene Know-how zurückgegriffen werden. Mit SOTP wurde die Comet Rendezvous/Asteroid Flyby (Craf)-Mission, die vierte der oben erwähnten »Core Program«-Missionen geplant, die gleichzeitig gebaut werden sollte. Im Laufe der Jahre stellte sich bei der Entwicklung jedoch heraus, daß die Idee mit standardisierten Modulen nicht so sinnvoll war, wie es zunächst den Anschein hatte. Die ständig notwendig werdenden Änderungen führten zu beträchtlichen Kosten, die den ursprünglichen Finanzrahmen sprengten. Außerdem stand die NASA auch schon damals unter dem Druck eines ständig schrumpfenden Budgets. Daher wurde Anfang 1992 das Craf-Projekt eingestellt, nur

die Arbeit an SOTP ging weiter, wobei jedoch ein für die Mission maßgeschneidertes Raumfahrzeug entwickelt wurde. Im Jahr 1986 wurde SOTP nach Giovanni Domenico Cassini (1625–1712) benannt. Cassini entdeckte die Saturnmonde Iapetus, Rhea, Dione und Tethys (vgl. Abb. 1) und die nach ihm benannte Teilung der Saturnringe.

Auch die Cassini-Mission stand mehrmals kurz davor, aus Kostengründen eingestellt zu werden. Der NASA war es jedoch gelungen, andere Raumfahrtorganisationen zur Mitarbeit an Cassini zu gewinnen. Daher hätte eine Einstellung des Cassini-Programms einen erheblichen Prestigeverlust für die USA bedeutet. 1988 entschloß

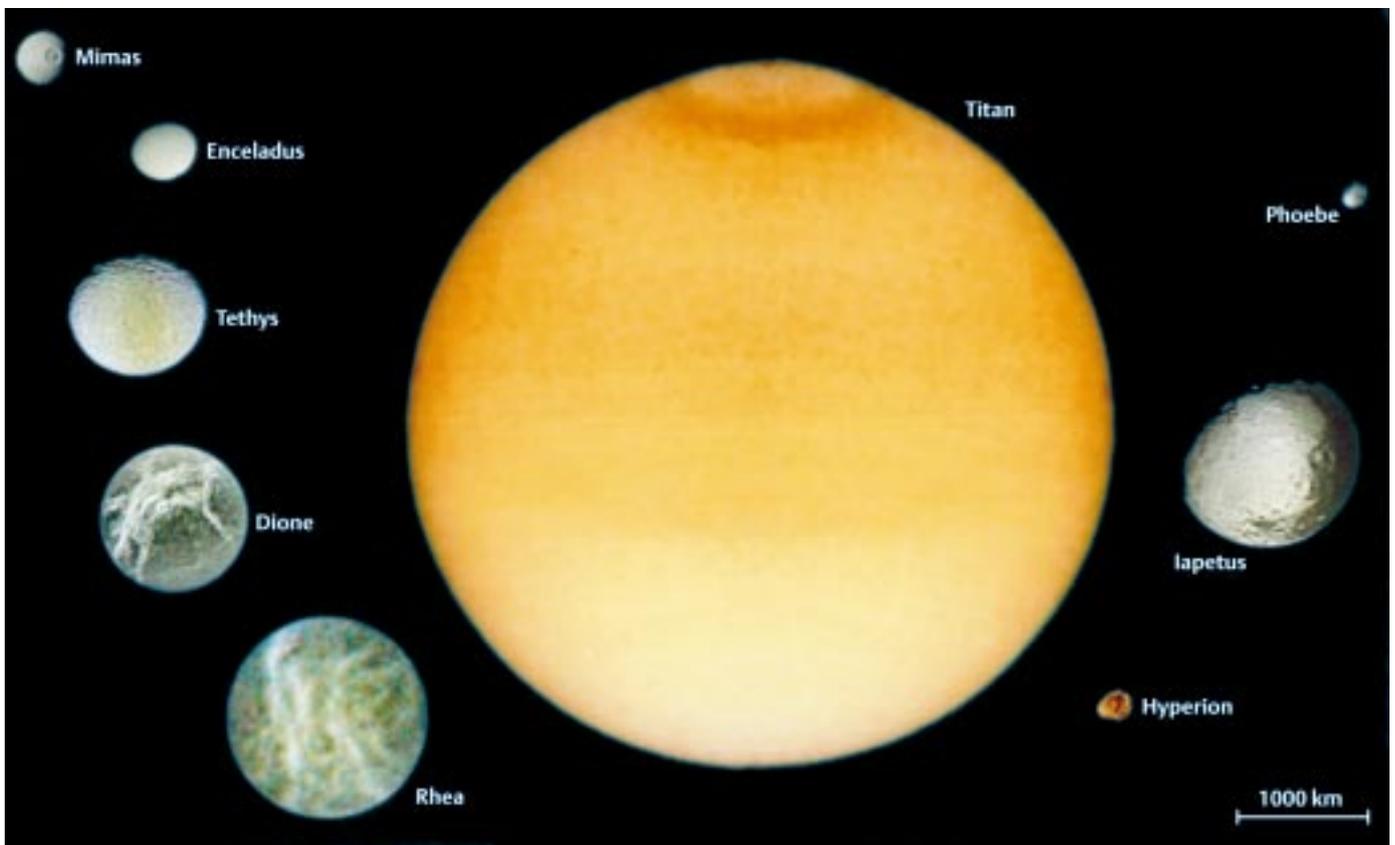


Abb. 1: Die neun größten Saturnmonde im richtigen Größenverhältnis zueinander. Man beachte die dominierende Größe von Titan, mit 5150 km Durchmesser der zweitgrößte Mond im Sonnensystem. Diese Montage wurde aus Aufnahmen der Raumsonden Voyager 1 und 2 aus den Jahren 1980 und 1981 zusammengesetzt. (DLR, Berlin)

sich die ESA endgültig, die Titan-Atmosphärensonde zu entwickeln. Diese erhielt den Namen Huygens nach Christian Huygens (1629–1695), dem Entdecker des Saturnmondes Titan und der wahren Natur der Saturnringe. Huygens ist die erste Planetensonde der ESA und ist von der Aufgabenstellung her sehr anspruchsvoll. Weitere Beiträge zu Cassini stammen von den nationalen Raumfahrt-Behörden Europas, so wurde z.B. die Hauptantenne von Cassini von Italien gebaut und bezahlt.

Insgesamt kosteten Entwicklung und Bau des Cassini-Orbiters etwa 1.5 Milliarden US-Dollar. Der Start und die Betriebskosten der Bodensysteme während der geplanten Primärmission von 10 Jahren Dauer werden nochmal mit 1.15 Milliarden US-Dollar zu Buche schlagen. Die europäische Huygens-Sonde kostet noch etwa 500 Millionen US-Dollar zusätzlich: Cassini stellt auch in finanzieller Hinsicht einen Rekord dar, der auch in fernerer Zukunft nicht mehr überboten werden wird.

Cassini-Orbiter

Der Cassini-Orbiter (Abb. 2 und 3) besteht aus vier Hauptbaugruppen: einem unteren Ausrüstungsmodul, dem Antriebsmodul, dem oberen Ausrüstungsmodul und der Parabol-Hauptantenne. Das untere Ausrüstungsmodul beinhaltet die Kreisel zur Lageregelung, die beiden Raketenmotoren des Hauptantriebs und trägt auf drei Auslegern die drei Radioisotopen-Generatoren zur Stromerzeugung. Das Antriebsmodul, die größte Baugruppe von Cassini, beinhaltet die Treibstofftanks, und ist annähernd zylinderförmig. Daran fügt sich das zwölfeckige obere Ausrüstungsmodul an, in dem sich die Bordrechner, die Datenspeicher und die Radarelektronik für die Erforschung des Saturnmondes Titan befinden. An zwei gegenüberliegenden Seiten des Zentralkörpers sind zehn der zwölf wissenschaftlichen Instrumente angebracht. Als Abschluß findet sich die vier Meter große Parabolhauptantenne, die zur Kommunikation mit der Erde, als Radarantenne und als Empfangsanlage für die Funksignale der Huygens-Sonde benötigt wird. Cassini ist in drei Achsen stabilisiert und richtet meist die Hauptantenne zur Erde aus. Insgesamt ist die Raumsonde 6.8 m hoch und hat ohne Treibstoffe ein Gewicht von 2543 kg, einschließlich der Huygens-Sonde. Davon entfallen etwa 300 kg allein auf die wissenschaftliche Nutzlast. Mit Treibstoffen wiegt Cassini insgesamt 5655 kg, mehr als alle anderen ins äußere Sonnensystem entsandten Raumsonden zusammen.

Das Antriebssystem von Cassini verwendet als Treibstoffe Stickstofftetroxid N_2O_4



Abb. 2: Cassini-Orbiter nahe bei Titan nach Abwurf der Huygenssonde (Gemälde). Im Hintergrund ist Saturn zu erkennen.

und Mono-Methylhydrazin $N_2H_3CH_3$. Diese Treibstoffe sind hypergol, d.h. sie entzündeten sich bei Kontakt spontan ohne Zündeinrichtung. Für kleine Bahnänderungen und Lageregelungskontrolle benutzt Cassini 16 kleine Triebwerke mit je 1 N Schub, die in vier Bündeln zu je vier Triebwerken auf Auslegern angebracht sind. Für große Bahnänderungen und das Abbremsen zum Einschwenken in die Saturnumlaufbahn verfügt Cassini über zwei Raketenmotoren mit je 445 N Schub. Es wird jeweils nur ein

Triebwerk für die Schubmanöver benutzt, das andere ist ein vollständig unabhängiges Reservesystem. Dieses kann vom Bordcomputer der Sonde bei Ausfall des ersten Triebwerks sofort aktiviert werden.

Zur Energieversorgung verwendet Cassini drei Radioisotopen-Generatoren (RTG). Diese RTGs sind am untersten Teil der Raumsonde in 120° -Winkeln zueinander angebracht. RTGs benutzen die beim radioaktiven Zerfall von Plutonium ^{238}Pu in Uran ^{234}U freiwerdende Wärme, die sie direkt

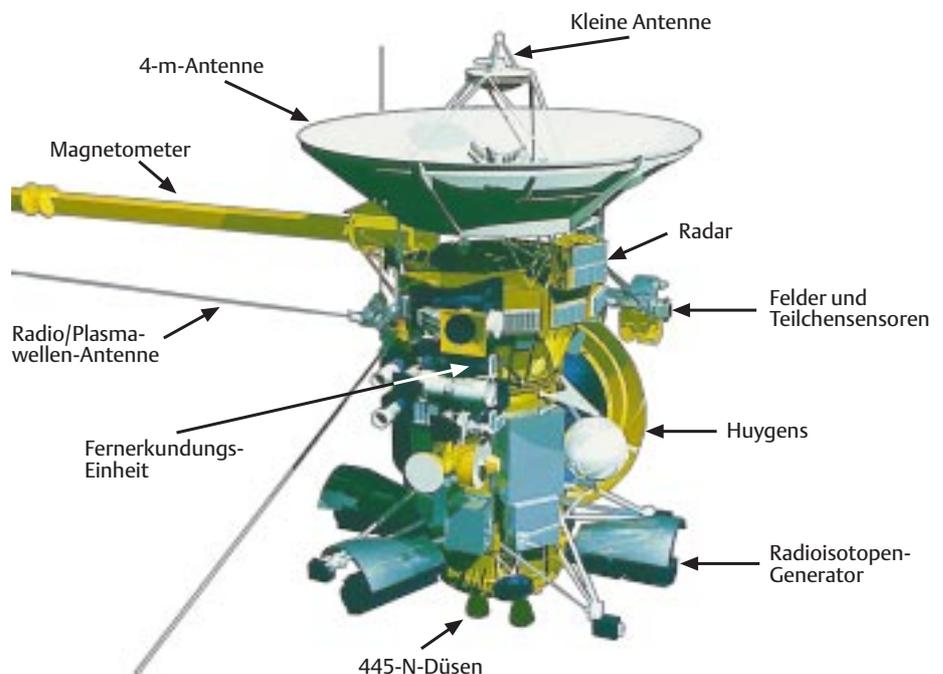


Abb. 3: Die wichtigsten Instrumente und Baugruppen von Cassini.

ohne jegliche bewegliche Teile in elektrischen Strom umwandeln. Zusammen erzeugen sie noch am Ende der Mission 628 Watt elektrische Leistung bei einer Spannung von 30 Volt. Das Plutonium in den RTGs ist in mehreren Hitzeschilden hermetisch verkapselt. Daher ist es praktisch unmöglich, daß es bei einem Fehlstart oder einem unbeabsichtigten Wiedereintritt in die Erdatmosphäre zu einer Freisetzung dieses hochgiftigen Schwermetalls kommt. Für den Fall von Fehlstart oder Nichteinschluß in die interplanetare Transferbahn zum Saturn existieren detailliert ausgearbeitete Notfallpläne.

Für die Datenübermittlung zur Erde verfügt Cassini über zwei 20-Watt-Wanderfeldröhrenverstärker, die Übertragungsraten von bis zu 190 kBit/s ermöglichen. Die Sendefrequenz beträgt 8.4 Gigahertz. Der Bordcomputer ist einer der höchstentwickelten Rechner, die jemals auf einer Raumsonde geflogen sind. Er verfügt über ein hohes Maß an autonomer Entscheidungsfreiheit über die Steuerung der Bordsysteme und kann Cassini über zwei Wochen vollautomatisch ohne Eingriffe von der Erde kontrollieren.

Da Cassini über keine schwenkbaren Instrumenten-Plattformen verfügt, werden bei der Datengewinnung die jeweiligen Instrumente auf das Zielobjekt ausgerichtet. Dabei muß jedoch die Hauptantenne von der Erde weggeschwenkt werden, so daß Echtzeit-Übertragungen nur sehr eingeschränkt über die Hilfsantennen erfolgen können. Aus diesem Grunde wurde der Orbiter mit zwei »solid-state«-Rekordern ausgestattet, die zur Speicherung und Zwischenlagerung der von der wissenschaftlichen Nutzlast erbrachten Meßdaten und Bilder dienen. Die »solid-state«-Datenspeicher verfügen über eine Kapazität von je 1.8 GBit. Diese Speicher ersetzen die üblichen mechanischen Magnetband-Speichergeräte mit all ihrer komplexen Mechanik, die zu Ausfällen oder Störungen neigt.

Die wissenschaftliche Nutzlast

Cassini verfügt über eine hochentwickelte und technisch anspruchsvolle wissenschaftliche Nutzlast (Tabelle 1). Sie besteht aus 12 verschiedenen Instrumenten, die in zwei Gruppen eingeteilt werden: einerseits fernerkundliche Instrumente, andererseits Geräte zur Untersuchung von Partikeln und elektromagnetischen Feldern und Wellen. Die beiden Instrumentengruppen sind räumlich getrennt auf annähernd gegenüberliegenden Seiten am Sonden-Zentralkörper angebracht.

Die fernerkundlichen Instrumente: Die vier fernerkundlichen Sensoren sind auf der

Tabelle 1: Cassinis Instrumente.

Instrument	Zielsetzung
Optische fernerkundliche Instrumente	
Komposit-Infrarot-Spektrometer CIRS	Spektrale Kartierungen zur Untersuchung von Temperaturen, Zusammensetzung von Oberflächen, Atmosphären und Ringsystem
Kameras ISS	Multispektrale Bilder von Saturn, Titan, Ringsystem und Eismonden
Abbildendes UV-Spektrometer UVIS	UV-Karten von Oberflächen und Ringsystem, Bestimmung der Wasserstoff/Deuterium-Verhältnisse
Abbildendes Spektrometer VIMS	Spektrale Karten zur Untersuchung von Zusammensetzungen und Strukturen von Oberflächen, Atmosphären und Ringsystem
Partikel- und Feld-Untersuchungen	
Plasma Spektrometer CAPS	Vor-Ort-Untersuchungen des Plasmas innerhalb und nahe der Saturn-Magnetosphäre
Kosmischer Staub-Analysator CDA	Untersuchung von Eis und Staubpartikeln im Saturnsystem
Ionen und Neutral Massenspektrometer INMS	Zusammensetzungen von neutralen und ionisierten Teilchen innerhalb der Saturn-Magnetosphäre
Magnetometer MAG	Untersuchungen des Saturnmagnetfeldes und seiner Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind
Abbildendes Magnetosphären-Instrument MIMI	Globale Bilder der Magnetosphäre und vor-Ort-Messungen im Magnetfeld
Radio- und Plasmawellen-Spektrometer RPWS	Untersuchung von Plasmawellen, Radio-Emissionen und Staub im Saturnsystem
Mikrowellen-Fernerkundung	
Cassini RADAR	Radarbilder, Altimetrie und Radiometrie der Titanoberfläche
Radio Science Subsystem RSS	Untersuchungen der Atmosphären und Ionosphären von Saturn und Titan, Erkundung des Schwerfelds von Saturn und seinen Monden

»Remote Sensing Pallet« montiert, die fest mit dem Sondenkörper verbunden ist. Daher besitzen die Instrumente keinerlei Schwenkmechanismus, d.h. die Raumsonde selbst muß für die Untersuchungen auf die Ziele ausgerichtet werden.

Die wohl interessantesten Geräte dürften die beiden Kameras des »Imaging Science Subsystem (ISS)« sein: eine Telekamera mit 2000 mm Brennweite und eine Weitwinkelkamera mit immerhin 200 mm Brennweite. Bei beiden Kameras sind CCD-Detektoren mit 1024×1024 Pixel im Einsatz.

Die Telekamera (Narrow Angle Camera NAC) verfügt über eine Spiegeloptik des Cassegrain-Typs und ist im Bereich von 200 nm bis 1100 nm, d.h. vom ultravioletten Licht bis deutlich ins Infrarote, empfindlich. Das Blickfeld beträgt 0°35 × 0°35, etwas kleiner als der von der Erde aus betrachtete Vollmond. NAC erreicht aus 166 000 km Entfernung eine Auflösung von 1 km pro Bildpunkt.

Die Weitwinkel-Kamera (Wide Angle Camera WAC) verfügt über ein Linsen-Ob-

jektiv, das praktisch unverändert von den Voyager-Raumsonden übernommen wurde. WAC ist vom blauen Licht bei 380 nm bis ins Infrarote bei 1100 nm empfindlich. Das Blickfeld beträgt 3°5 × 3°5, die Auflösung ist zehnmal geringer als bei der Telekamera.

An der Entwicklung von ISS ist auch das Institut für Planeten-Erkundung in Berlin-Adlershof durch Prof. Gerhard Neukum beteiligt.

Das *Visual and Infrared Mapping Spectrometer* (VIMS), ebenfalls ein abbildendes Instrument, arbeitet im Spektralbereich von 350 nm (Nahes UV) bis 5100 nm (mittleres Infrarot). Es erreicht nicht die hohe räumliche Auflösung des Kamerasystems, verfügt jedoch über einen wesentlich größeren Spektralbereich und besitzt insgesamt 352 Spektralkanäle. Daher lassen sich aus den VIMS-Daten Informationen über Zusammensetzung, Temperatur und Struktur der beobachteten Objekte gewinnen. Beide Kanäle (UV und Infrarot) werden durch eine gemeinsame Hauptelektronik

gesteuert und synchronisiert, die gleichzeitig auch die Stromversorgung, den Datenfluß zur Raumsonde und die Telemetrie regelt. Auch an VIMS ist das Berliner Institut für Planeten-Erkundung beteiligt.

Der *Ultraviolet Imaging Spectrograph* (UVIS) besteht aus vier Instrumenten, die im Bereich des ultravioletten Lichts von 55.8 nm bis 190 nm arbeiten. UVIS untersucht sowohl die Zusammensetzungen der Atmosphären von Saturn und Titan, als auch die Zusammensetzung der Ringpartikel und der kleineren Monde.

Das *Composite Infrared Spectrometer* (CIRS) arbeitet im Spektralbereich von 7 bis 1000 Mikrometern und besteht aus drei Interferometern, die ein einzelnes Teleskop nutzen. CIRS mißt die infrarote Strahlung, die von den Atmosphären von Saturn und Titan, dem Ringsystem und den anderen Monden ausgesandt wird, um ihre chemische Zusammensetzung und ihre Temperaturen zu bestimmen.

Cassini verfügt über ein weiteres fernerkundliches Instrument, das »Cassini Radar Subsystem«, meist nur als »Radar« bezeichnet. Das Radarsystem benutzt die große Parabolantenne der Raumsonde als Sende- und Empfangsanlage. Wenn Cassini im Radar-Modus arbeitet, ist die Hauptantenne auf das jeweilige Zielobjekt ausgerichtet, so daß keine direkte Kommunikation mit der Erde möglich ist. Die aufgenommenen Daten werden daher auf den beiden Daten-Massenspeichern für die spätere Übertragung zwischengelagert.

Das wichtigste Zielobjekt für dieses Instrument ist der Saturnmond Titan, dessen Oberfläche im Bereich des sichtbaren Lichts, durch atmosphärische Schwebeteilchen (Aerosole), ähnlich jenen des Planeten Venus, unsichtbar ist. Man hofft im Verlauf der Primärmission etwa ein Drittel der Oberfläche kartieren zu können. Das Radar soll jedoch auch zur Untersuchung der Partikel des Ringsystems und der Oberflächen der kleineren Saturnmonde eingesetzt werden.

Partikel- und Feld-Instrumente: Bei diesen sechs Geräten handelt es sich um Instrumente, die Untersuchungen in situ durchführen, also in der unmittelbaren Umgebung der Raumsonde. Die meisten dieser Geräte sind auf einer Plattform auf der Seite am Sondenzentralkörper angebracht, die den fernerkundlichen Instrumenten gegenüberliegt.

Der »Weltraumstaub-Analysator« (*Cosmic Dust Analyzer*, CDA) ist ein in Deutschland am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg unter der Leitung von Prof. Eberhard Grün entwickeltes und gebautes Gerät. Er dient zur direkten Beobachtung feiner Staubteilchen im Saturnsystem und untersucht deren chemische

Zusammensetzung, physikalische Eigenschaften und räumliche Verteilung. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen dieser Staubteilchen mit den Ringen, Monden und dem Magnetfeld des Saturn ziehen.

Das »Ionen- und Neutral-Massenspektrometer« (*Ion and Neutral Mass Spectrometer*, INMS) untersucht die Zusammensetzung elektrisch geladener und neutraler Atome und Moleküle. Daraus läßt sich die Zusammensetzung der Hochatmosphäre von Titan und der Strahlungsgürtel des Saturnmagnetfeldes ermitteln. INMS ist ein Spektrometer des Quadrupol-Typs und kann Massen von 1 bis 99 Atom-Masseneinheiten auflösen. Im Falle von Einzelatomen kann das gesamte Periodensystem vom Wasserstoff bis zum Molybdän (Ordnungszahl 42) gemessen werden.

Das *Cassini-Plasma-Spektrometer* (CAPS) ist ebenfalls ein Massenspektrometer und mißt den Ionenfluß in Abhängigkeit von Masse pro Ladung. Zusätzlich wird auch der Elektronen- und Ionenfluß in Abhängigkeit von der Energie pro Ladung und des Auftreffwinkels zum Instrument gemessen. CAPS wird die Atmosphären und Ionosphären von Saturn und Titan untersucht und die Wechselwirkungen der Plasmen der Magnetosphäre Saturns mit den Ringen und den Mondoberflächen studieren.

Das *Radio- und Plasmawellen-Instrument* (RPWS) dient der Messung der elektrischen und magnetischen Felder im Saturnsystem. Mit diesem Instrument wird außerdem die Elektronendichte und Temperatur des interplanetaren Mediums und der planetaren Magnetfelder festgestellt. RPWS besteht aus Sensoren für elektrische und magnetische Felder, aus einer Langmuir-Sonde und drei Radiowellen-Empfängern.

Das *Magnetospheric Imaging Instrument* (MIMI) wurde entwickelt, um Zusammensetzung, Ladungszustand und Energieverteilung hochenergetischer Ionen und Elektronen im Saturnsystem zu bestimmen. Erstmals sollen außerdem Bilder eines planetaren Magnetfeldes aufgenommen werden. Diese dienen zur Ermittlung der allgemeinen Form und Veränderungen des Magnetfeldes in Folge der Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind, dem Ringsystem, der Saturnatmosphäre und den Monden.

Cassini verfügt über zwei Magnetometer, ein Vektor/Skalarmagnetometer und ein Fluxgate-Magnetometer. Beide Instrumente sind auf einem nach dem Start ausgefahrenen Mast von etwa 10 m Länge angebracht. Dies ist notwendig, da sonst das schwache Eigenmagnetfeld der Cassini-Bordelektronik die Messungen stark verfälschen würde.

Wissenschaftliche Zielsetzungen

Cassinis Hauptaufgabe ist die Vertiefung und Fortführung der durch Pioneer 11, Voyager 1 und 2 in den Jahren 1979–1981 begonnenen detaillierten Erkundung des Saturnsystems. Anders als die Vorgänger-Sonden, die nur kurze Vorbeiflüge durchführten, ist Cassini in der Lage, das Langzeitverhalten des Saturnsystems über mindestens vier Jahre zu untersuchen.

Beim Planeten Saturn liegt das Hauptinteresse in der Erforschung der Atmosphäre. Besonderes Interesse besteht in der Bestimmung der Temperaturverteilungen, der Verteilung von Wind und Wolken und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphärogase. Aus den Windverteilungsmustern lassen sich Informationen über die Struktur und Rotation der tiefen Atmosphäre ableiten. Daraus lassen sich wichtige Hinweise über Bildung und Entwicklung des Saturn gewinnen. Für diese Aufgaben kommen vor allem die fernerkundlichen Instrumente zum Einsatz.

Zusätzlich sollen auch das Saturn-Magnetfeld, die Ionosphäre und ihre zeitlichen Veränderungen erforscht werden. Mit Hilfe der Radio-Antennen soll nach den spezifischen Radio-Impulsen von Blitzentladungen in der Atmosphäre Ausschau gehalten werden.

Auch das äußerst komplexe Ringsystem soll gründlich untersucht werden. Insbesondere sind die Zusammensetzung und Größenverteilung der Ringpartikel von Interesse. Nach dem bisherigen Wissensstand dürfte Wassereis der Hauptbestandteil sein. Ebenfalls soll erkundet werden, wie die Ringe ihre heutige Form und Ausdehnung erhalten haben und welche Kräfte das Ringsystem kontrollieren. Neben der Schwerkraft sind hier vor allem die Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld und Erosionsprozesse durch Staub und Kleinstmeteoreiten für die Struktur verantwortlich. Auch durch die Schwerkraft der Saturnmonde werden die Ringe auf komplexe Weise beeinflusst. Schon auf Voyager-Aufnahmen wurden Kleinmonde von wenigen Kilometern Durchmesser gefunden, die im Ringsystem den Saturn umkreisen. Daher soll nach weiteren Saturnsatelliten Ausschau gehalten werden.

Der Saturnmond Titan wäre sogar eine eigene Orbitermission zusätzlich zu Huygens wert, so hoch wird seine Bedeutung für die Planetologie eingeschätzt. Im Mittelpunkt stehen die Atmosphäre und der feste Mondkörper. Im Falle der Atmosphäre erhofft man sich detaillierte Informationen über die Zusammensetzung der Hauptgase, einschließlich der Edelgase. Auch die Isotopenverhältnisse der Hauptelemente sollen untersucht werden. Daraus erhofft

man sich Aufschluß über Entstehung und Entwicklung von Titan und seiner Atmosphäre. Besonderes Interesse besteht hier am Nachweis komplexer organischer Verbindungen. In vielerlei Hinsicht ähnelt nämlich Titans Atmosphäre einer frostigen Version der frühen irdischen Lufthülle, die ja ebenfalls überwiegend aus Stickstoff bestand.

Im Falle des festen Mondkörpers ist die Charakterisierung der Oberfläche, insbesondere ihrer Topographie und Zusammensetzung, von vorrangigem Interesse. Hierfür ist in lokaler Hinsicht die Huygens-Sonde zuständig, die allgemeine globale Charakterisierung wird vornehmlich durch das Radarsystem des Cassini-Orbiters vorgenommen werden. Dabei soll auf den Nachweis von Einschlagskratern von Asteroiden oder Kometen besonderes Gewicht gelegt werden. Auch nach Veränderungen der Oberfläche durch endogene geologische Prozesse soll Ausschau gehalten werden. Endogen bedeutet, daß die Energie dieser geologischen Prozesse aus dem Inneren des Mondes stammt. Hierzu zählen vor allem Vulkanismus und Tektonik, die z.B. für die Zerstörung von Einschlagskratern sorgen und so die Oberfläche umgestalten. Es ist durchaus möglich, daß es auf Titan Seen oder Meere aus organischen Flüssigkeiten wie Ethan, Propan, etc. gibt, die auf der Erde als Bestandteile von Erdgas gut bekannt sind. Zusätzlich könnte es auch Wolkenbildung mit Ethan-Regen oder Schnee geben.

Mit Hilfe der dichten Vorbeiflüge am Titan lassen sich aus den Veränderungen in der Bahnbewegung des Orbiters wertvolle Informationen über den inneren Aufbau des Mondes gewinnen. Damit kann zweifelsfrei festgestellt werden, ob Titan differenziert ist, also aus einem dichteren Kern und einen weniger dichten Mantel besteht. Falls Titan ähnlich der Erde einen Kern besitzt, muß er in seiner geologischen Jugend vor über vier Milliarden Jahren im Inneren recht heiß gewesen sein. Nur dann konnten die schwereren Bestandteile ins Zentrum absinken.

Aber auch die kleineren Saturnmonde, von denen mindestens 17 bekannt sind, sollen ausführlich erkundet werden. Hier werden vor allem die fernerkundlichen Instrumente von Cassini eingesetzt werden, um die grundsätzlichen Eigenschaften und die jeweiligen geologischen Geschichten der einzelnen Körper zu definieren. Besonderes Interesse finden hier vor allem die dunklen, organischen Verbindungen, die sich auf verschiedenen Monden befinden. Hier ist der zweitäußerste Saturnmond Iapetus, mit 1436 km Durchmesser einer der größten Saturnsatelliten, besonders interessant. Aus unbekanntem Grund ist eine

Hemisphäre des Mondes praktisch tief-schwarz gefärbt, während die anderen Regionen sehr hell sind.

Ein weiterer rätselhafter Mond ist der Saturnsatellit Enceladus mit nur etwa 500 km Durchmesser. Seine Oberfläche zeigt die Spuren intensiver geologischer Aktivität. Vermutlich sorgt eine Gezeitenresonanz mit dem äußeren Satelliten Dione, der für einen Saturnumlauf genau doppelt so lange wie Enceladus benötigt, für die Aufheizung dieses kleinen Mondes. Daher ist es nicht ausgeschlossen, daß Enceladus auch noch heute vulkanisch aktiv ist. Cassini wird nach vulkanischen Eruptionen Ausschau halten.

Die Huygens-Mission

Huygens ist die erste ESA-Raumsonde zu den äußeren Planeten und der wichtigste Beitrag zur Cassini-Mission. Die Raumsonde wurde in Eigenverantwortung der ESA in Europa entwickelt und gebaut. Hauptauftragnehmer war der französische staatliche Raumfahrtkonzern »Aerospatiale«, Integration und Tests wurden bei der DASA in München durchgeführt.

Das Aussehen von Huygens wird von dem für den Atmosphäreneintritt notwendigen Hitzeschild dominiert (Abb. 4). Er hat die Gestalt eines an der Spitze abgestumpften breiten Kegels von 2.7 m Durchmesser. Die besonderen Verhältnisse Titans (geringe Schwerkraft, jedoch eine dichte

Atmosphäre) führen dazu, daß der Hitzeschild einen wesentlich größeren Durchmesser aufweist als die eigentliche Sonde. Der Hitzeschild ist aus keramischen Kacheln, ähnlich jenen des Space Shuttle Orbiter aufgebaut. Der rückwärtige Hitzeschild der Sonde besteht aus Aluminium mit einem dünnen Überzug aus dem gleichen keramischen Material. Beide Hitzeschilde zusammen wiegen etwas mehr als 100 kg, also rund ein Drittel der Huygens-Gesamtmasse von 343 kg.

Das Descent Module, die eigentliche Sonde (Abb. 5), hat die Gestalt eines abgestumpften Kegels mit rundem Boden. Der Durchmesser beträgt 1.6 m, die Höhe 64 cm. Das Gesamtgewicht beträgt rund 240 kg, wobei 48 kg auf die wissenschaftliche Nutzlast entfallen. Die Struktur des Descent Module besteht aus Aluminium. Alle sechs wissenschaftlichen Instrumente sind auf einer Experimentenplattform angebracht, die sich an der breitesten Stelle im Inneren des Descent Module befindet. Oberhalb der Instrumente schließt sich die Antennen-Plattform mit den beiden Sendeantennen und den beiden Fallschirm-Paketen für den Abstieg in der Titanatmosphäre an. Huygens verfügt über zwei vollständig redundante Sender mit je 10 Watt Leistung, die maximal 8 kBit/s Daten an den Cassini-Orbiter übertragen können. Huygens ist für die Landung auf einer beliebigen festen oder flüssigen Oberfläche ausgelegt und soll von dieser mindestens für 180 s Daten und Bilder übertragen.

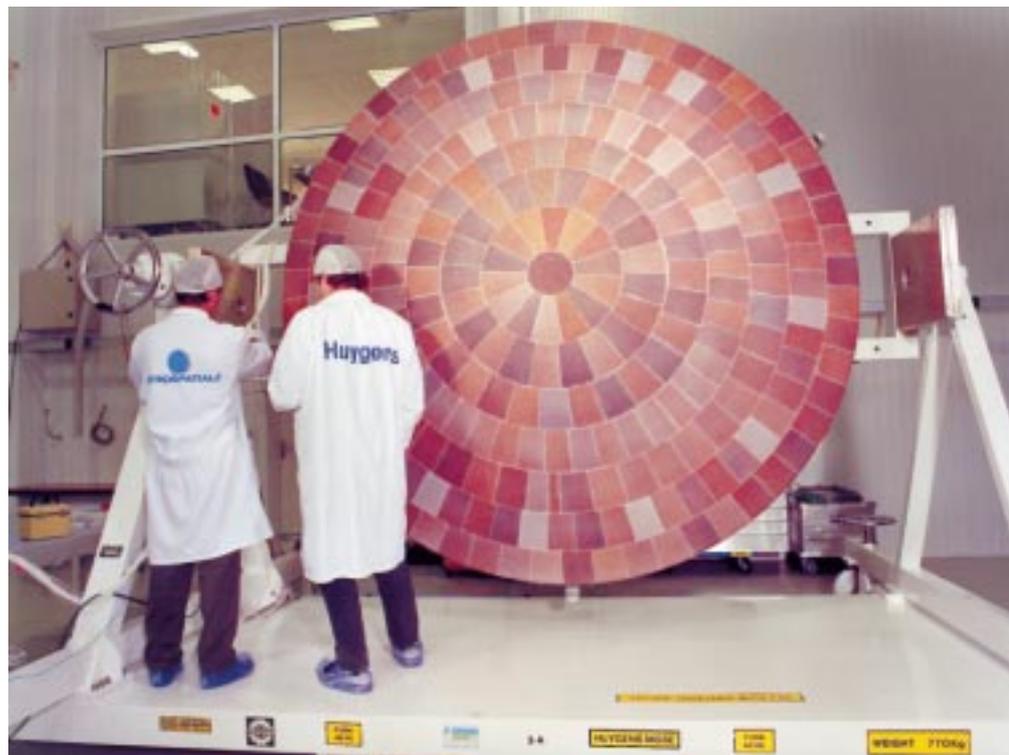


Abb. 4: Der vordere Hitzeschild von Huygens während der Endmontage. Gut sind die einzelnen Keramikplatten erkennbar.



Abb. 5: Das Flugmodell von Huygens im Reinraum der DASA kurz vor dem Aufsetzen des hinteren Hitzeschildes (links). Rechts von der Bildmitte ist das »Descent Module« zu erkennen, welches von einem sechseckigen Halterahmen umgeben ist.

Huygens' Instrumente

Huygens ist mit sechs wissenschaftlichen Geräten ausgestattet, die ein umfassendes Bild der Verhältnisse auf Titan liefern werden.

Der *Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR)* ist eine Kamera, die während des Abstiegs Bilder von den Wolken und der Oberfläche übermitteln wird. DISR verfügt über zwei Sensorköpfe, einer blickt mit einem 25°-Winkel zum Nadir (Fußpunkt) nach unten, während der andere auf den Horizont gerichtet ist. Die Brennweite der Sensoroptiken beträgt 5,2 mm, es handelt sich um ausgesprochene Weitwinkel-Objektive.

Der nach unten gerichtete Sensorkopf verfügt über zwei Bildkanäle, die beide im Spektralbereich von 660 bis 1000 nm arbeiten. Die Bildkanäle verfügen über Blickfelder von $9^{\circ}6' \times 15^{\circ}$ und $21^{\circ} \times 30^{\circ}$.

Der seitwärts gerichtete Sensorkopf arbeitet im selben Spektralbereich und verfügt über ein Blickfeld von $26^{\circ} \times 51^{\circ}$. Da Huygens am Fallschirmseil um die Mittelachse rotiert, lassen sich damit 360°-Panorama-Bilder aufnehmen. Neben den beiden Hauptkameras gibt es auf dem Detektorchip noch Platz für zwei Spektrometerkanäle und eine »Solar-Aureolen-Kamera«. Letztere dient zur Untersuchung der Absorption und Beugung des Sonnenlichts durch die Titan-Atmosphäre.

Kurz vor dem Aufsetzen werden die Bilder eine Auflösung von etwa einem Meter pro Pixel aufweisen. Nach der Landung erreicht der seitliche Sensor eine Auflösung von etwa 4 cm pro Pixel in unmittelbarer Nähe zur Huygens-Sonde. DISR wird etwa

jede Minute ein Bild aufnehmen, kurz vor der Landung sogar alle 10 Sekunden. Insgesamt sollen etwa 1100 Bilder aufgenommen werden.

Das *Gas-Chromatograph-Massenspektrometer (GCMS)* dient zur Analyse der Atmosphärgase und Oberflächenmaterialien. Das Instrument arbeitet mit zwei Meßverfahren, entweder als reines Massenspektrometer oder mit Vorschaltung des Gas-Chromatographen, mit dessen Hilfe sich die Komponenten der Gase vor der Analyse voneinander trennen lassen. Das Massenspektrometer analysiert die Molekular- oder Atommassen der eingelassenen Gase, indem es diese elektrisch auflädt (ionisiert) und durch elektrische und magnetische Felder nach Massen getrennt einem Ladungsdetektor zuführt. Dieser zählt die Anzahl der ankommenden Ladungen, woraus sich die Menge und die Art der untersuchten Gase ermitteln läßt.

Das *Aerosol-Sammler- und Pyrolyse-Instrument (ACP)* dient zum Sammeln feinsten fester Partikel in der Titanatmosphäre. Dazu verfügt das Instrument über einen ausfahrbaren Probensammler, der zweimal Proben aus der Atmosphäre entnimmt. Die erste Probennahme findet in 40 km Höhe über der Titanoberfläche statt, die zweite zwischen 23 bis 18 km Höhe. Nach dem Ausfahren des Probensammlers wird durch eine Pumpe die Atmosphäre mitsamt ihrer Schwebstoffe durch feine Filter gepreßt. Jeder Filter wird etwa 30 Mikrogramm auffangen. Nach der Probennahme wird der Filter in einen kleinen Ofen zurückgezogen. Dieser wird in drei Temperaturstufen die Schwebstoffe ausheizen. Zuerst werden die leichtflüchtigen Gase ausgetrieben, danach

zersetzen sich die komplexen organischen Bestandteile und Moleküle, und zum Schluß werden die temperaturbeständigen Feststoffe verdampft. Alle freigesetzten Stoffe werden zum GCMS-Instrument (s.o.) weitergeleitet, wo die eigentliche Analyse stattfindet.

Das *Huygens Atmosphären-Struktur Instrument (HASI)* besteht aus mehreren Sensoren, die die physikalischen Eigenschaften der Titan-Atmosphäre, einschließlich ihrer elektrischen Besonderheiten, untersuchen sollen. HASI verfügt über ein Thermometer, einen Drucksensor, Beschleunigungsmesser zur Messung der Abbremsung beim Atmosphäreneintritt und Sensoren zur Messung elektrischer Felder in der Atmosphäre. Zusätzlich ist HASI in der Lage, die Daten des Radar-Höhenmessers auszuwerten und daraus Informationen über die Topographie der Oberfläche und ihrer Radar-Reflektionseigenschaften zu gewinnen. Der Radar-Höhenmesser ist kein speziell wissenschaftliches Instrument, sondern dient zur Steuerung des Abstiegs von Huygens durch die Titan-Gashülle.

Das *Doppler-Wind-Experiment (DWE)* nutzt die beiden Bordsender für Untersuchungen der Windbewegungen in der Atmosphäre von Titan. Dazu wurden den Sendern jeweils ein ultrastabiler Oszillator hinzugefügt, der eine genau bekannte Trägerwellen-Frequenz erzeugt. Durch die Bewegung der Huygens-Sonde wird diese Frequenz geringfügig verändert. Dieser Effekt ist der gleiche Doppler-Effekt, der auch bei Schallwellen auftritt und sich in Veränderungen der Tonhöhe bemerkbar macht.

Die *Surface Science Package (SSP)* dient der Untersuchung der Titan-Oberfläche nach der Landung. Ein Beschleunigungsmesser mißt die Wucht des Aufschlags auf der Oberfläche, und andere Sensoren messen den optischen Brechungsindex, die Oberflächentemperatur, die Wärmekapazität und die Schallgeschwindigkeit des Oberflächenmaterials.

Flugverlauf: Verglichen mit der auf über zehn Jahre angelegten Lebensdauer des Cassini-Orbiters ist der Huygens-Sonde nur ein sehr kurzes eigenständiges Leben beschieden. 22 Tage nach der Abtrennung vom Orbiter wird sie am 27. November 2004 in die Atmosphäre von Titan eintreten und für maximal drei Stunden Daten vom Abstieg und von der Oberfläche selbst zum Orbiter senden. Während der drei Wochen Anflug »schläft« Huygens, nur eine dreifach redundante Zeitschaltuhr (Timer) läuft. In dieser Zeit wird Huygens durch Rotation um die Zentralachse stabilisiert, es sind keinerlei Steuertriebwerke vorhanden.

Etwa eine Viertelstunde vor Atmosphären-eintritt aktiviert der Timer in 1270 km Höhe über der Titan-Oberfläche die Bordelektronik. Die Geschwindigkeit beträgt jetzt etwa 22 000 km/h: Huygens tritt in die Gashülle ein und wird innerhalb von nur fünf Minuten auf 1080 km/h abgebremst. In einer Höhe von etwa 180 km wird der Pilot-Fallschirm von 2 m Durchmesser durch einen Mörser im oberen Hitzeschild ausgeschossen. Dieser Fallschirm zieht den oberen Hitzeschild weg und ermöglicht somit die Öffnung des ersten Hauptfallschirmes von 8,3 m Durchmesser. Dieser ist speziell für eine Hochgeschwindigkeits-Öffnung ausgelegt und sorgt für eine abrupte Abbremsung von Huygens auf 366 km/h. Nach einer halbminütigen Stabilisierungsphase wird der vordere Hitzeschild abgeworfen und die wissenschaftlichen Instrumente werden aktiviert.

Etwa 15 Minuten nach Aktivierung der Instrumente wird der große Fallschirm abgeworfen, und ein dritter, etwa 3 m großer Fallschirm wird geöffnet. Dies geschieht, um die Abstiegszeit zur Oberfläche auf unter 2,5 h zu verkürzen. Die Batterie-Lebensdauer ist begrenzt und die rapide Auskühlung der Bordelektronik durch die kalte Titanatmosphäre bedroht die Funktionstüchtigkeit der Raumsonde. Huygens befindet sich zu diesem Zeitpunkt etwa 105 km über der Oberfläche. Durch sogenannte »spin vanes« an der Außenseite des Descent Module wird die Raumsonde ähnlich einem Windrad in Rotation um die Mittelachse versetzt. Dies geschieht, damit die Instru-

mente möglichst in alle Richtungen blicken können, wodurch die Datenausbeute weiter gesteigert wird. Nun sinkt Huygens langsam zur Oberfläche ab und übermittelt einen stetigen Datenstrom zum Cassini-Orbiter.

Nach zweieinhalb Stunden setzt Huygens mit etwa 20 km/h auf der Oberfläche auf (Abb. 6). Nun beginnt eine mindestens dreiminütige Meßphase auf der Oberfläche, egal ob diese fest oder flüssig ist. Falls genug Energie in den Batterien vorhanden ist, kann Huygens noch für etwa 30 Minuten Daten an Cassini übertragen, danach schwenkt Cassini die Hauptantenne von Titan weg zurück zur Erde, um mit der Übertragung der wertvollen Daten zu beginnen. Huygens wird entweder durch die Kälte von -180°C oder durch die Entladung der Batterien funktionsuntüchtig werden.

Start und Flugverlauf

Am 6. Oktober 1997 öffnet sich ein 25tägiges Startfenster für Cassini. Der Flug (Abb. 7) beginnt am 6. Oktober um 11:38 Uhr MESZ. Als Trägerrakete dient die Titan-IVB Centaur, eine dreistufige Rakete mit zwei Feststoffboostern. Beim Start werden sowohl die beiden Feststoffbooster als auch der Antrieb der ersten Stufe gezündet. 2 min und 23 s nach dem Abheben werden die Feststoffbooster nach dem Ausbrennen abgeworfen und 3 min und 26 s nach dem Start wird die Nutzlast-Schutzhülle abgesprengt. Nach weiteren 113 Sekunden ist die erste Stufe ausgebrannt und wird abge-

worfen. Nun zündet die zweite Stufe für 259 Sekunden. Etwa 10 Minuten nach dem Start trennt sich die Centaur-Oberstufe mit der Cassini-Raumsonde von der zweiten Stufe. Nun werden die beiden Raketen-Motoren der Centaur-Oberstufe zum ersten Mal gezündet. Nach 134 s Brenndauer ist ein elliptischer Parkorbit von 170 mal 445 km Höhe erreicht, auf dem die Oberstufen-Raumsonden-Kombination für etwa 16 Minuten verbleibt. Nun zündet die Centaur zum zweitenmal, nach 6 min und 48 s ist die Erdfluchtgeschwindigkeit erreicht. Fünf Minuten später trennen sich Oberstufe und Raumsonde, Cassini ist nun auf seinem langen Weg zum Saturn.

Selbst die stärkste Trägerrakete der USA, die Titan IVB-Centaur, ist nicht in der Lage, die 5,8 t schwere Cassini-Sonde in eine direkte Transferbahn zum Saturn einzuschleusen. Um das Ziel dennoch erreichen zu können, muß die Raumsonde vier relativ dichte Vorbeiflüge an drei verschiedenen Planeten durchführen. Dabei wird der Raumsonde auf Kosten der Bahnenergie des jeweiligen Planeten Bewegungsenergie zugeführt. Da jedoch die Masse von Cassini gegenüber derjenigen eines Planeten absolut unbedeutend ist, ist der Energieverlust für den betroffenen Planeten unmeßbar klein. Dieses Beschleunigungsverfahren, auch als gravity-assist bekannt, wurde erstmals 1974 mit der Raumsonde Mariner-10 an der Venus durchgeführt, um den sonnennächsten Planeten Merkur erreichen zu können.

Der Bahnverlauf von Cassini ist äußerst kompliziert und wird als VVEJGA bezeichnet (Venus-Venus-Earth-Jupiter-Gravity-Assist). Diese Bezeichnung gibt die zeitliche Abfolge der Planetenvorbeiflüge an. Cassini steuert nach Verlassen der Parkbahn um die Erde zunächst die Venus an, die er bereits am 21. April 1998 erreichen wird. Der geringste Abstand zur Planetenoberfläche wird nur 300 km betragen. Da Cassini eigentlich für das Saturnsystem mit viel geringerer Sonnenstrahlung (etwa 2 % der auf der Erde eintreffenden Intensität) konzipiert ist, müssen zum Schutz vor Überhitzung besondere Maßnahmen getroffen werden: Die Hauptantenne wird direkt auf die Sonne gerichtet und schattet den Rest der Raumsonde vor der Strahlung ab. Während praktisch des gesamten Fluges im inneren Sonnensystem muß die Antenne auf die Sonne gerichtet bleiben. Daher stehen zur Kommunikation nur zwei kleine Rundstrahlantennen zur Verfügung, was ähnlich geringe Datenraten wie bei der Galileo-Mission bedeutet (Galileos ähnlich einem Regenschirm aufklappbare Antenne verklebte sich und zwang zur Benutzung der kleinen Rundstrahlantennen für die gesamte Mission). Daher können die Meßdaten, die möglicherweise bei den Venus-



Abb. 6: Huygens nach dem Aufsetzen auf der Titanoberfläche (Gemälde).

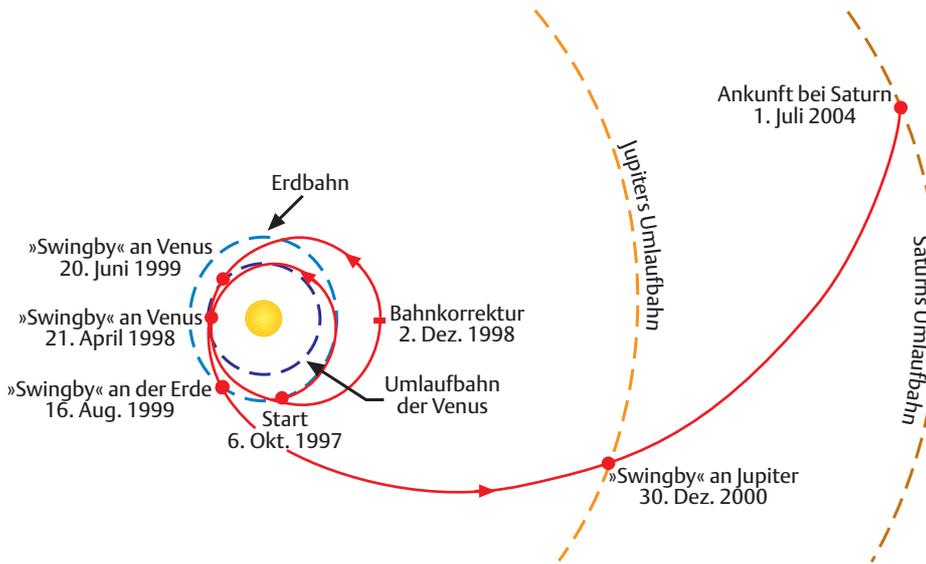


Abb. 7: Die Interplanetare Flugbahn von Cassini im Sonnensystem.

Vorbeifügen gesammelt werden, nicht direkt zur Erde übertragen werden, sondern müssen auf dem Daten-Massenspeicher zwischengelagert werden. Nach dem ersten Venus-Vorbeiflug fliegt Cassini eine weite Ellipsenbahn um die Sonne, die deutlich über die Erdbahn hinausführt. Nach Erreichen des Aphels (sonnenfernster Punkt der Umlaufbahn) mit einem Abstand von 236 Millionen km zur Sonne um den 2. Dezember 1998, führt Cassini ein »Deep Space Maneuver« mit dem Haupttriebwerk durch. Dadurch wird die Umlaufbahn um die Sonne so geändert, daß die Raumsonde wieder die Venus anfliegt. Der zweite Vorbeiflug mit einem Minimalabstand von 2267 km zur Oberfläche findet am 20. Juni 1999 statt. Durch diesen Vorbeiflug gewinnt Cassini soviel Schwung, daß er bereits nach etwa 58 Tagen (!) die Erde erreicht, die er am 16. August 1999 in 500 km Abstand passieren wird. Cassini ist nun schnell genug, den Jupiter zu erreichen. Der Vorbeiflug am Jupiter erfolgt in einem großen Abstand von 10 Millionen km am 30. Dezember 2000. Dieser relativ große Abstand ist dadurch bedingt, daß Jupiter sich nicht mehr in der optimalen Position zum Schwungholen befindet, jedoch reicht die Beschleunigung aus, um Saturn zu erreichen. Dabei wird Jupiter intensiv von den fernerkundlichen Instrumenten untersucht werden, da die Galileo-Mission bereits Ende 1999 beendet sein sollte. Nun ist Cassini auf dem Weg zum Saturn, den er in dreieinhalb recht ruhigen Jahren erreichen wird. Während der ganzen Reise wird die wissenschaftliche Nutzlast immer wieder Routinechecks unterworfen und die Geräte werden auf ihre Einsatzbereitschaft überprüft. Etwa ein halbes Jahr vor Ankunft wird die Raumsonde mit systematischen Beobachtungen des Ringplaneten und seiner Monde beginnen.

Ankunft

Die Ankunft (Abb. 8) bei Saturn ist für den 1. Juli 2004 vorgesehen. Bereits 19 Tage früher wird der äußerste Saturnmond Phoebe in etwa 50 000 km Abstand passiert. Falls es die Treibstoffvorräte erlauben, kann durch ein kleines Korrekturmanöver diese Distanz auf bis zu 17 000 km verkleinert werden. Dies ist die einzige Gelegenheit während der gesamten Mission, diesen ungewöhnlichen Mond aus der Nähe zu untersuchen. Phoebe mißt ungefähr 220 km im Durchmesser und umläuft Saturn in etwa 13 Millionen km Abstand. Die Bahn ist 150° gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt, und Phoebe benötigt für einen Umlauf 550 Tage, rotiert jedoch in 9,4 h um die eigene Achse. Aufgrund dieser ungewöhnlichen Eigenschaften wird ver-

mutet, daß es sich bei Phoebe um einen eingefangenen Asteroiden oder Kometen handeln könnte. Durch die schnelle Eigenrotation ist es möglich, während des Vorbeiflugs fast die gesamte Oberfläche des Mondes mit einer Auflösung von mindestens 1 km pro Pixel aufzunehmen.

Nach dem Phoebe-Vorbeiflug nähert sich Cassini weiter dem Saturn. In etwa 340 000 km Abstand zur Oberfläche wird der Mond Titan im Bereich des Südpols überflogen. Etwa zwei Stunden vor Erreichen des geringsten Abstands zum Saturn wird die Ringebene im Zwischenraum zwischen dem F- und dem G-Ring passiert (Abb. 9). Nach dem bisherigen Wissensstand über das Ringsystem ist in diesem Bereich mit sehr wenigen Partikeln zu rechnen. Eine Kollision mit einem nur 1 cm großen Ringpartikel würde für Cassini aufgrund der hohen Geschwindigkeiten das Ende bedeuten. Etwa 96 Minuten vor Erreichen des Minimalabstands von 20 000 km zur Saturnoberfläche wird das Haupttriebwerk gezündet und brennt für mindestens die gleiche Zeit. Dadurch wird die Geschwindigkeit von Cassini relativ zu Saturn um 2236 km/h reduziert, so daß die Raumsonde in eine langgestreckte Ellipsenbahn um den Ringplaneten eintritt. Kurz vor und nach dem Abbremsmanöver ergeben sich aufgrund des geringen Abstands äußerst gute Gelegenheiten zur Beobachtung des Ringsystems und der Saturn-Atmosphäre. Wiederum etwa zwei Stunden nach dem Abbremsmanöver wird die Ringebene ein zweites Mal passiert. Cassini ist nun auf der ersten Ellipsenbahn mit einer Umlaufperiode von 147 Tagen und einer Maximalentfernung von etwa 10 Millionen km. 73 Tage nach dem Abbremsen in die Umlaufbahn wird ein Schubmanöver zur

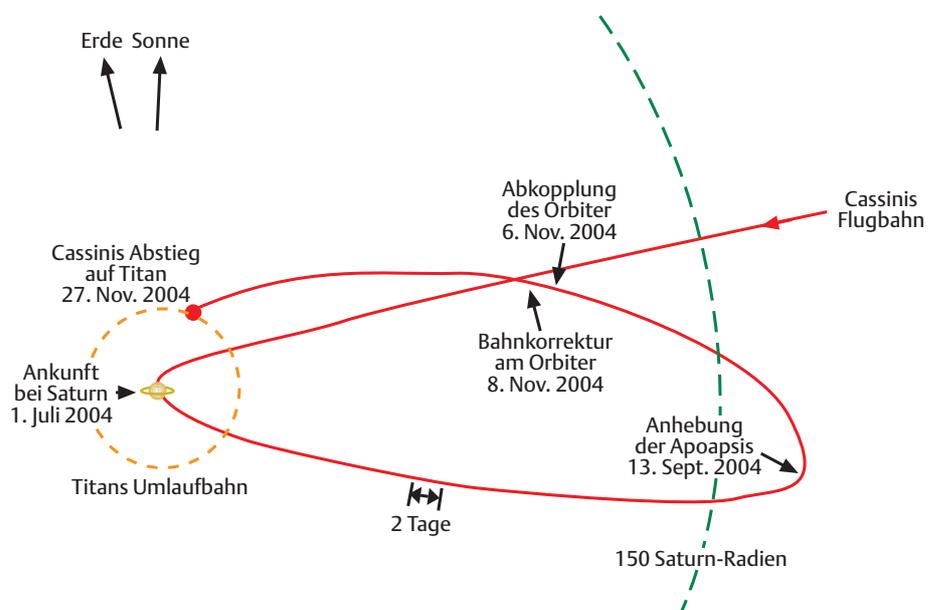


Abb. 8: Ankunft und erster Orbit von Cassini im Saturnsystem.

Anhebung des saturnfernsten Punktes (Apoapsis) auf 8,2 Saturnradien (1 SR = 60 330 km) durchgeführt, und die Raumsonde auf den Weg zum ersten Titan-Vorbeiflug gebracht. Mit diesem Manöver endet die Initial Orbit Phase und die sogenannte Probe-Phase beginnt.

Die Probe-Phase

Etwa drei Monate nach dem Einschluß auf die Saturnumlaufbahn fällt nach eingehender Überprüfung der Geräte von Huygens die Entscheidung, ob die Atmosphärensonde bereits auf diesem Orbit wie vorgesehen auf den Weg zum Titan gebracht wird. Falls alles in Ordnung ist, wird Cassini etwa einen Monat später, am 3. November 2004, durch ein Schubmanöver auf Kollisionskurs mit dem Mond Titan gebracht. Am 5. November ist es dann soweit: Der Cassini-Orbiter richtet sich exakt auf die Flugbahn ein, die elektrischen Verbindungen zu Huygens werden gekappt und die Eintritts-sonde wird in Rotation (10 U/min) um die Mittelachse versetzt. Nun zünden kleine Trennladungen, und vorgespannte Federn drücken Huygens von Cassini weg. Huygens wird nun 22 Tage auf sich alleingestellt auf Titan zufliegen und am 27. November 2004 in Titans Atmosphäre eintreten. Zwei Tage nach dem Absetzen von Huygens führt der Cassini-

Orbiter ein »Deflection Maneuver« mit den Triebwerken durch, um den Kollisionskurs mit Titan zu verlassen und eine Überflughöhe von 1500 km über der Oberfläche zu erreichen. Damit wird gleichzeitig der Orbiter in eine günstige Position gebracht, um die Datenübertragung von Huygens zu maximieren. Cassini wird maximal drei Stunden lang die Signale von Huygens aufzeichnen können, bevor er aus dem Sichtfeld der Landesonde fliegt. Nachdem die Landemission von Huygens beendet ist (siehe oben), beginnt die zweite wichtige Phase der Cassini-Mission, die Orbital Tour.

Die Orbital Tour

Der endgültige Verlauf der »Orbital Tour« wird frühestens nach dem Erdvorbeiflug im Sommer 1999 festgelegt werden. Zur Zeit gibt es drei Varianten der »Orbital Tour« mit den Bezeichnungen 18-2, 18-3 und 18-4, die sich in zeitlicher Abfolge und Anzahl der Mondvorbeiflüge geringfügig unterscheiden. Von den beteiligten Wissenschaftlern wird die Variante 18-4 bevorzugt (Abb. 10). Die »Orbital Tour« von Cassini im Saturnsystem ist nicht so übersichtlich wie die Erkundung von Jupiter und seinen Monden durch Galileo (siehe Abb. 10a und 10b). Während bei Galileo in der Primärmission nur 11 Orbits vorgesehen sind, werden es

bei Cassini 60 bis 70 Umläufe innerhalb von vier Jahren sein. Die Umlaufperioden variieren zwischen 8 und 146 Tagen mit Bahnneigungen von 0° bis 76° zum Saturnäquator. Diese stark veränderlichen Umlaufbahnen ergeben gute Möglichkeiten zur Beobachtung des Ringsystems und zur Erforschung der Magnetosphäre. Bei Sonnen- und Sternbedeckungen durch Saturn und seine Ringe lassen sich detaillierte Informationen über die Zusammensetzung der Saturnatmosphäre und die Feinstrukturen des Ringsystems gewinnen. Insgesamt wird es etwa 40 nahe Vorbeiflüge am Mond Titan geben. Cassini wird außerdem mindestens sieben dichte Vorbeiflüge an den Monden Enceladus, Dione, Rhea und Iapetus im Abstand von weniger als 10 000 km durchführen. Es werden mindestens drei nahe Enceladus-Vorbeiflüge durchgeführt, einmal werden jeweils Iapetus, Rhea und Dione passiert. Während der ganzen Mission wird es zu 30–40 weiteren Vorbeiflügen an den kleineren Saturnmonden in Abständen von weniger als 100 000 km kommen.

Im Gegensatz zum Jupitersystem verfügt Saturn nur über einen massereichen Mond, der für »Gravity assist«-Manöver für Bahnänderungen geeignet ist, nämlich Titan. Alle 17 weiteren Saturnmonde sind für solche Manöver viel zu massearm. Daher müssen alle gewählten Umlaufbahnen die Raumsonde mit möglichst wenig Treibstoffein-

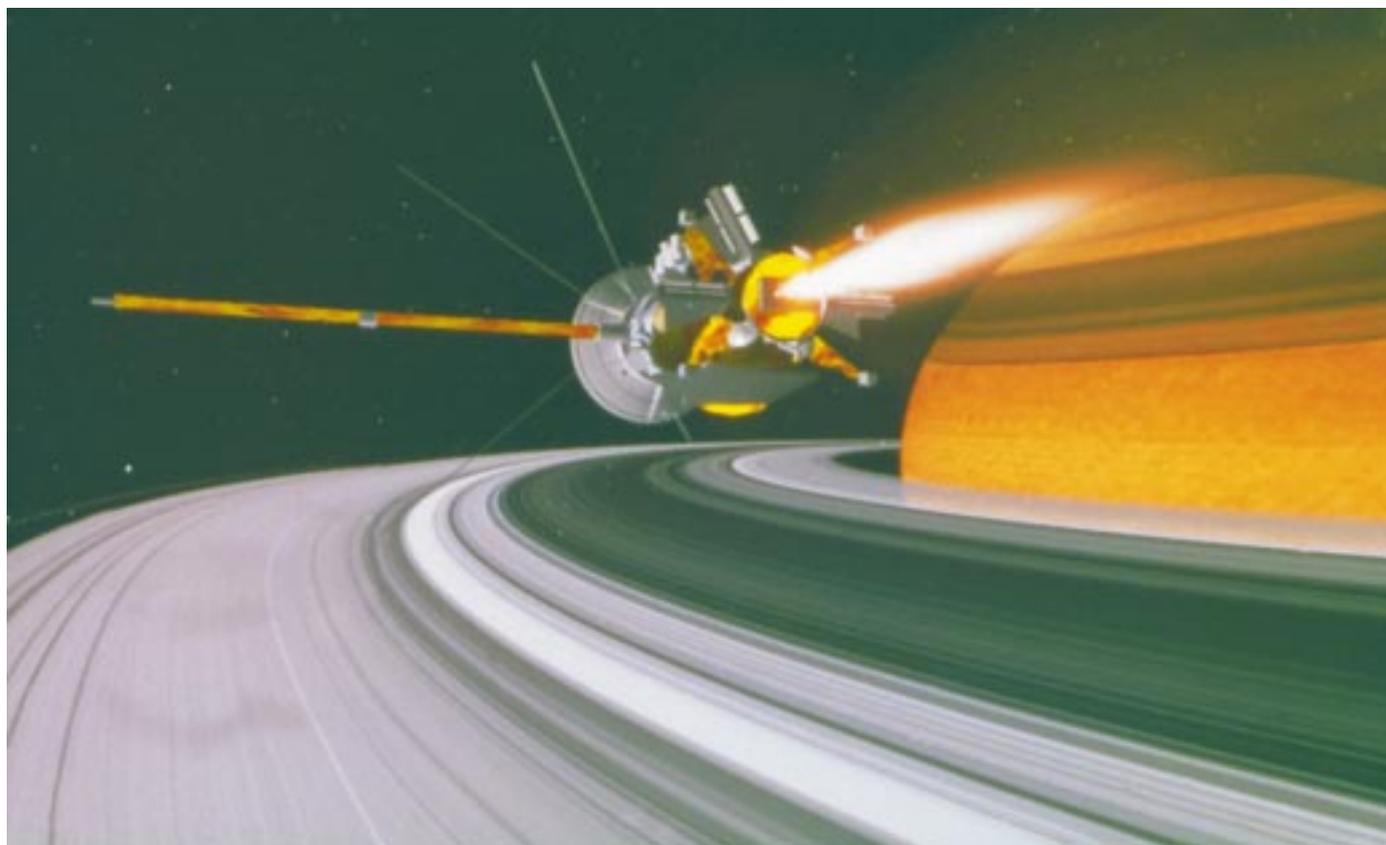


Abb. 9: Cassini über den Saturnringen während der Abbremsphase in die Saturnumlaufbahn. (Computergraphik).

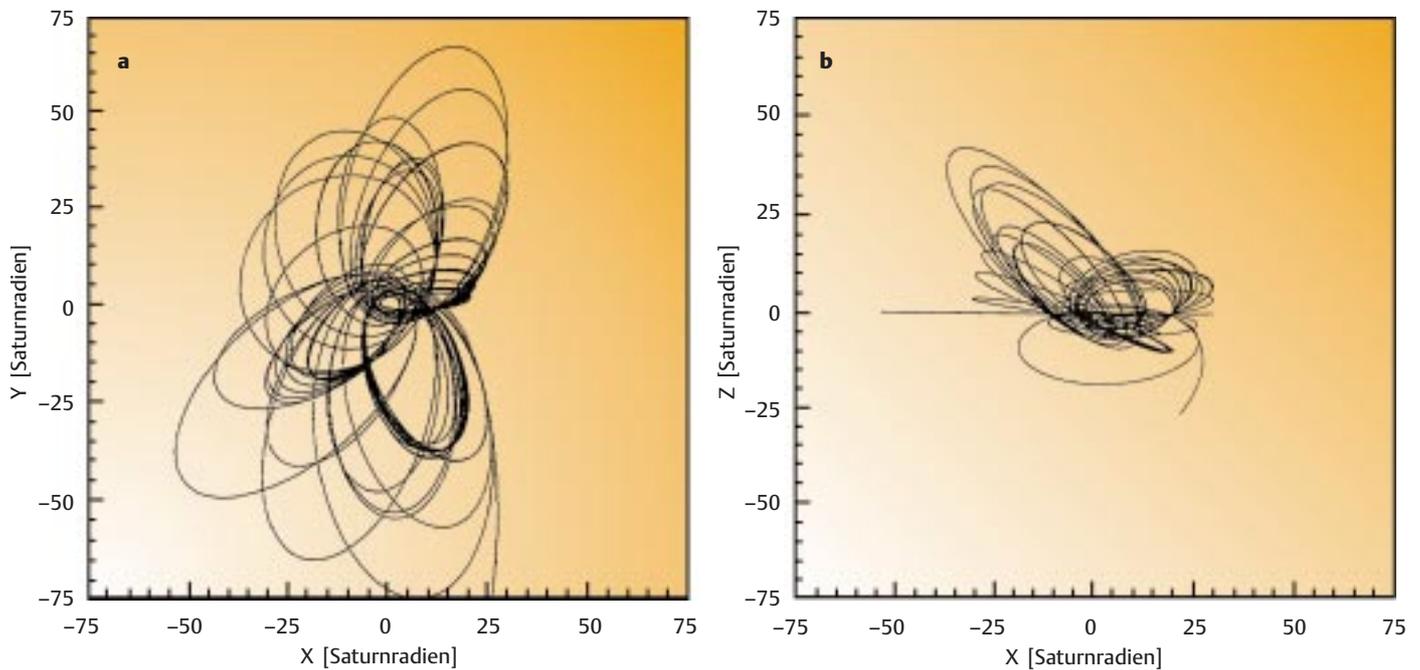


Abb. 10: Die »Orbital Tour« 18-4. a) Blick auf den Saturn-Nordpol; b) Blick in Richtung auf den Saturnäquator.

satz zum Titan zurückführen. Die Titanvorbeiflüge werden in Abständen von 950 km bis 16200 km zur Oberfläche durchgeführt werden. Unterhalb von 950 km Höhe ist die Titanatmosphäre bereits dicht genug, um Cassinis Flugbahn zu beeinflussen. Die Vorbeiflüge müssen in Hinsicht auf die Gesamtmission optimiert werden. Die wissenschaftlichen Ziele eines jeden Vorbeiflugs richten sich daher nach den von der »Orbital Tour« vorgegebenen Abständen und Beleuchtungsverhältnissen. Bei den nahen Vorbeiflügen werden häufig das Radar und die Massenspektrometer zum Einsatz kommen, da diese nicht von der Beleuchtung abhängig sind. Cassini bewegt sich bei den dichten Vorbeiflügen schon in den äußersten Schichten der Titanatmosphäre, so daß in-situ-Messungen der Atmosphären-Zusammensetzung möglich sind. In diesen Höhen kann die Huygens-Sonde keine Untersuchungen vornehmen, weil sie noch vom Hitzeschild umgeben ist. Die im optischen Bereich und bei benachbarten Wellenlängen arbeitenden Fernerkundungsexperimente werden bei den weniger nahen Vorbeiflügen zum Zuge kommen. Sie werden vor allem die Dunst- und Wolkenschichten des Titan untersuchen und damit die Windverteilungsmuster und die Zirkulation der Atmosphäre vier Jahre lang dokumentieren. Zum Ende der Mission befindet sich Cassini in einem stark geneigten und kurzperiodischen Orbit mit einer Umlaufperiode von nur 8 Tagen um Saturn. Daher fliegt sie in kurzen Abständen am Titan, der ungefähr 16 Tage für einen Umlauf um Saturn benötigt, vorbei. Die Aussichten sind nicht schlecht, daß Cassini nach Ablauf der vier Jahre langen Primärmission im Juli 2008 immer noch in

gutem Zustand ist und eine Verlängerung der Mission möglich ist. Cassini wird, wenn alles nach Plan verläuft, eine der erfolgreichsten Planetenmissionen überhaupt sein und unser Wissen über das Saturnsystem und seine Welten revolutionieren. □

Der Autor dankt Frau Susanne Pieth, DLR-RPIF und Dipl.-Ing. Tilmann Denk, beide Institut für Planetenerkundung, DLR, Berlin-Adlershof, für ihre freundliche Unterstützung. Ebenfalls Dank an Mary Beth Murrill vom JPL, Pasadena, CA. Bildnachweis: NASA-JPL; ESA; Aeropatiale.

Anzeige