



STERNE UND WELTRAUM

Transit Venus vor der Sonne



TELESKOPE
Ein Fernrohr zum
Schnäppchenpreis

SONDE CASSINI
Anflug auf den
Ringplaneten Saturn

KALIFORNIEN
Astroreisen im
Wilden Westen





• Mimas

• Dione

Die Raumsonde CASSINI erreicht Saturn

Die langjährige Erforschung des Planeten, seiner Ringe und Monde beginnt

Nach einer fast sieben Jahre währenden Reise durch das Sonnensystem wird das Raumsondengespann CASSINI/HUYGENS am 1. Juli den Saturn erreichen. Schon seit Anfang Februar liefert CASSINI kontinuierlich Daten vom Ringplaneten und seinen Monden. Am 14. Januar 2005 soll HUYGENS den großen Mond Titan erkunden, während CASSINI auf einer mindestens vier Jahre dauernden »Orbit Tour« Saturn 75-mal umkreisen soll. Teil 1 dieser Artikelserie beschreibt die Mission bis zum Abschluss der Beobachtungen vor dem Erreichen der Umlaufbahn.

VON TILMANN DENK



• Enceladus



◀ Saturn, am 8. März 2004 aus einer Entfernung von 56.4 Mio.km, aufgenommen von der Raumsonde CASSINI. Gut erkennbar der Schattenwurf des Planeten auf die Ringe (links) und der Ringe auf den Planeten (oben). (Bild: NASA/JPL/Space Science Institute)

▲ Sommer 1997: Die beinahe fertig montierte Raumsonde wartet in der Montagehalle auf den Transport zur Raketenspitze. Oben erkennt man die große Antenne, rechts die HUYGENS-Sonde, unten die Haupttriebwerke und links die Fernerkundungsinstrumente. (Bild: NASA/JPL)

Die Aufgabe der US-Raumsonde CASSINI besteht in der Erforschung des Ringplaneten Saturn, seiner Atmosphäre, seines inneren Aufbaus, seiner Monde, seiner Ringe und seines Magnetfeldes. An CASSINI andockt ist die unter Leitung der europäischen Raumfahrtbehörde ESA entwickelte Atmosphären-Eintauchsonde HUYGENS, deren Ziel die Erkundung des großen Mondes Titan ist. HUYGENS soll Anfang 2005 in die Gashölle von Titan eintreten und während eines mehrstündigen Sinkfluges zahlreiche Messungen durchführen sowie Bilder aufnehmen.

Flug durch das innere Sonnensystem

Der Start von CASSINI/HUYGENS gelang mit neuntägiger Verspätung, am 15. Oktober 1997, und führte die Sonden zunächst zur Venus, die am 26. April 1998 in 287 km Höhe überflogen wurde. Am 3. Dezember 1998 folgte eine Triebwerkszün-

dung, welche die Geschwindigkeit von CASSINI um 1620 km/h erhöhte und die Sonde auf erneuten Venus-Kurs brachte. Der zweite Vorbeiflug erfolgte am 24. Juni 1999 in 603 km Höhe und beförderte CASSINI/HUYGENS auf eine Flugbahn, welche die Sonden ohne eine Extra-Umrundung der Sonne in nur $54\frac{1}{3}$ Tagen am 18. August 1999 bis auf 1180 km an unsere Erde heranführte. Die Pläne CASSINIS, wie sie im Oktober 1997 zum Zeitpunkt des Starts bekannt waren, sind in SuW 10/1997, S. 838 ff. ausführlich beschrieben. Vieles, aber nicht alles, ist tatsächlich so eingetreten oder durchgeführt worden wie damals geplant.

Die nahen Vorbeiflüge an großen Planeten im inneren Sonnensystem waren notwendig, da die Trägerrakete TITAN-4B, mit der CASSINI von der Erde weggebracht worden war, nicht leistungsfähig genug ist, um eine Masse von über $5\frac{1}{2}$ Tonnen direkt zum Saturn zu befördern. Durch gezielte Vorbeiflüge an massereichen

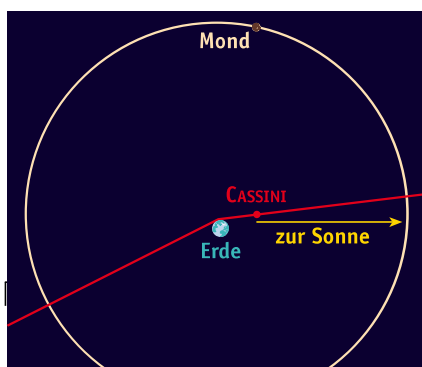
Körpern ist es möglich, durch Impulsaustausch die Geschwindigkeit eines Satelliten erheblich zu verändern. Wie wirksam diese Methode ist, lässt sich daran erahnen, dass CASSINI beim Erdvorbeiflug um fast 20 000 km/h beschleunigt wurde. Die Kreisbahngeschwindigkeit eines Erdsatelliten ist nur etwa 1.5 Mal so groß. Bei Flügen ins äußere Sonnensystem sind, falls keine direkte Flugbahn gewählt werden kann, drei Vorbeiflüge an Venus und/oder Erde notwendig (zwei Vorbeiflüge würden im Prinzip genügen, wenn der Satellit durch die feste Oberfläche hindurch fliegen könnte, was offensichtlich nicht möglich ist).

Diese so genannte Swing-by- oder Gravity-Assist-Technik wurde Anfang der sechziger Jahre von einem CALTECH-Studenten in Los Angeles entdeckt. Sie hat sich seit der Reise von MARINER 10 zum Merkur und viel offensichtlicher noch bei der »Großen Tour« der Sonde VOYAGER-2 zu allen vier Riesenplaneten als un-



▲ Unser Mond: CASSINI-Aufnahme vom 18. August 1999 (rechts) und eine Aufnahme eines irdischen Amateurteleskops. Zum Zeitpunkt des Vorbeiflugs war zunehmender Halbmond. Da das Bild von CASSINI wenige Stunden vor der geringsten Annäherung an die Erde aufgenommen wurde, konnte die Kamera am rechten Rand einen kleinen Teil der Mondrückseite sehen.

▼ Flugbahn von CASSINI/HUYGENS durch das Erde-Mond-System. Eingezeichnet ist die Position von CASSINI zu dem Zeitpunkt, an dem der Mond oben rechts photographiert wurde. Da die große Antenne zur Sonne ausgerichtet war und die Kameras genau im rechten Winkel zur Antenne montiert sind, betrug der Winkel Sonne-CASSINI-Mond in dem Moment, in dem der Mond durch das Bildfeld der Kameras zog, ebenfalls genau 90° .



schätzbar wertvolle Methode zur Energieeinsparung und Reisezeitverkürzung bewährt. Eine detaillierte Beschreibung des Prinzips findet sich in SuW 12/2003, S. 22 ff.

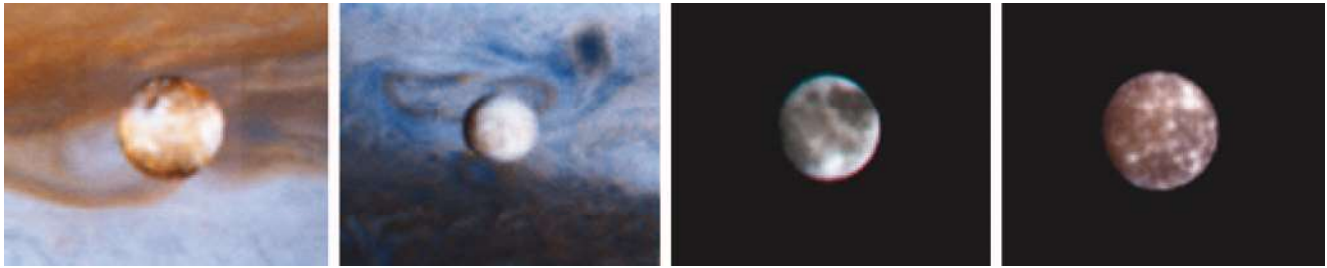
Während des größten Teils der ersten Flugphase bis zum 1. Februar 2000 musste die Hauptantenne von CASSINI zur Sonne ausgerichtet werden, damit die empfindlichen Elektronikbauteile abgeschattet und vor unzulässiger Erwärmung geschützt werden konnten. Dies war ein wichtiger Grund, warum vom Anflug auf die Erde oder vom Abflug keine Aufnahmen gemacht werden konnten. Während der größten Annäherung befand sich CASSINI über der dunklen Nachtseite. Lediglich der »vorbeziehende« Halbmond wurde photographiert. Da die Aufnahmen fast mit dem Zeitpunkt der größten Annäherung an die Erde zusammenfielen, war die Perspektive ungefähr identisch mit jener Sicht (Bild oben), die auch wir Erdenbürger auf den zunehmenden Mond hatten.

Ein Problem mit HUYGENS

Kurze Zeit nach dem Erdvorbeiflug wurde ein Datenübertragungstest durchgeführt, der die Empfangssysteme für die HUYGENS-Mission überprüfen sollte. Dabei zeigte sich, dass die übertragenen Daten nicht decodiert werden konnten. Nach und nach, insbesondere nach einem weiteren Test im Sommer 2000, wurde klar,

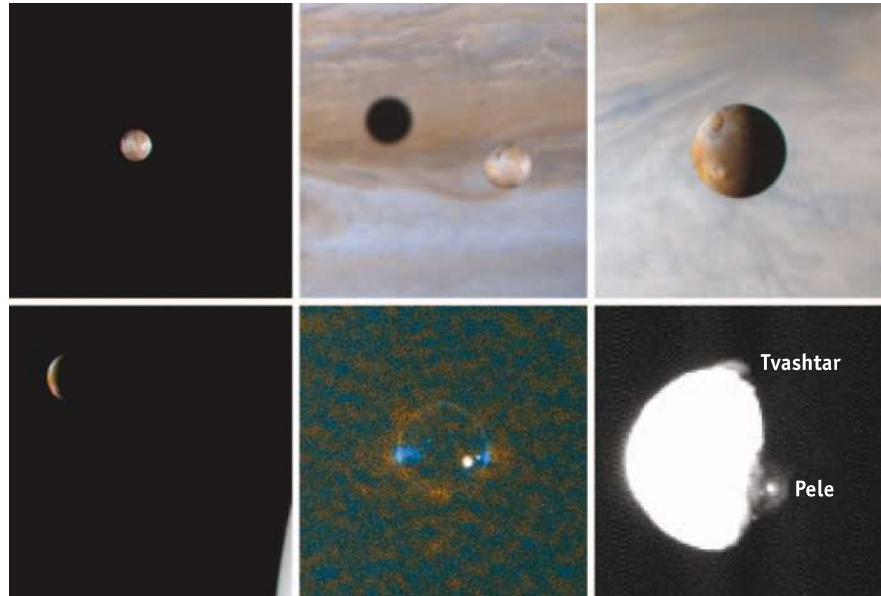
dass CASSINI nicht in der Lage sein würde, alle Signale von HUYGENS korrekt zu empfangen. Während der Landungsmission von HUYGENS, die damals noch für den 27. November 2004 vorgesehen war, nähert sich der CASSINI-Orbiter sehr schnell an Titan an – mit über 21 000 km/h. Diese schnelle Annäherung bewirkt eine so große Verschiebung der Frequenzen der Signale von HUYGENS, dass diese Frequenzen außerhalb der Bandbreite des Empfängers an Bord von CASSINI zu liegen kommen. Das aber würde den Totalverlust der HUYGENS-Mission bedeuten!

Was tun, wie HUYGENS retten? Im Prinzip reicht die Bandbreite des Empfängers an Bord von CASSINI aus, wenn die Sonde während der Mission von HUYGENS in einer größeren Distanz am Titan vorbeifliegt und somit während der Zeit, in der HUYGENS sendet, nicht (fast) direkt auf Titan zurast, sondern mehr seitlich vorbeizieht. Während der HUYGENS-Mission müsste CASSINI also auf großzügige 60 000 km und nicht auf 1200 km an Titan herangeführt werden. Andererseits ist dies nicht einfach umplanbar, da Titan für Bahnänderungen im Saturnsystem unverzichtbar ist – jeder nahe Vorbeiflug bewirkt Geschwindigkeitsänderungen in der Größenordnung einer ein bis zwei Stunden dauernden Triebwerkszündung. Und der CASSINI-Titanvorbeiflug »T1« während der HUYGENS-Mission hatte eine wichtige Funktion für die Bahnkorrektur.



▲ CASSINI-Aufnahmen der vier Galileischen Monde (von links) Io, Europa, Ganymed und Callisto vom Dezember 2000. Von den Monden ist jeweils die jupiterabgewandte Seite zu sehen.

▶ CASSINI-Aufnahmen des Jupitermonds Io. Die obere Reihe wurde beim Anflug und der größten Annäherung aufgenommen. Das Bild unten links zeigt Io beim Abflug, rechts daneben während einer Finsternis, der helle Fleck stammt von glühender Lava des Vulkans Pele. Rechts unten eine überbelichtete Aufnahme, in der Eruptionen der Vulkane Pele und Tvashtar erkennbar sind. (Bilder: NASA/JPL/Space Science Inst.)



Die elegante Lösung bestand schließlich darin, CASSINI/HUYGENS in den ersten Monaten der Mission eine Extrarunde um Saturn drehen zu lassen. CASSINI/HUYGENS soll bei der Ankunft am Saturn etwas stärker abgebremst werden und somit in eine Umlaufbahn eintreten, die genau 32 Tage oder zwei Titanumkreisläufe kürzer ist, als die ursprünglich geplante Bahn. Titan wird also schon am 26. Oktober 2004 erstmals von CASSINI gezielt angeflogen, dieser Vorbeiflug heißt jetzt »Ta«. Mit einer Überflughöhe von 1200 km kann die Bahn gezielt verändert werden. Ein zweiter Titan-Vorbeiflug, »Tb« am 13. Dezember 2004 in 2210 km Distanz zur Oberfläche, ersetzt dann den »T2«-Vorbeiflug, der für den 14. Januar 2005 vorgesehen war.

Mit diesen beiden für die Bahnkorrektur wichtigen Vorbeifügen kann CASSINI jetzt am 14. Januar 2005 beim Vorbeiflug »Tc« in bequemen 60 000 km Distanz den Signalen der HUYGENS-Sonde lauschen, ohne in »Doppler-Verlegenheit« zu geraten oder von der vorgeplanten Bahn abzukommen. Wenige Wochen später, beim Titan-Vorbeiflug »T3« am 15. Februar, befindet sich CASSINI dann wieder beinahe auf der Referenz-Flugbahn, die schon im Jahr 1999 nach jahrelanger Arbeit festgelegt wurde.

Positive Nebeneffekte der neuen Bahn oder Trajektorie sind relativ nahe Vorbeiflüge an den Monden Dione im Dezember 2004, Iapetus in der Silvesternacht

2004 und Enceladus im Februar 2005. Die Nachteile sind ein höherer Treibstoffverbrauch insbesondere beim Einschuss in die Saturnumlaufbahn sowie der Wegfall des Ersatztermins für die HUYGENS-Mission für den Fall, dass aus kurzfristig eintretenden technischen Gründen die Mission zum eigentlichen Termin nicht ausgeführt werden kann. Zahlreiche Optimierungen der Bahn verringerten das erste Problem auf ein akzeptables Niveau. Ausführliche Studien für eine Bahnänderung CASSINIS zwischen Januar und September 2005 ergaben die Möglichkeit einer kurzfristigen Reaktion und Anpassung der Bahn für den (Not-)Fall, dass HUYGENS nicht zum geplanten Termin einsatzbereit sein sollte. In diesem Fall würde der Titan-Vorbeiflug »Tc« in 1100 km Distanz und die HUYGENS-Mission entweder am 15. Februar 2005 (der Vorbeiflug würde dann »Td« genannt) oder am 7. Juni 2005 (Vorbeiflug »Tf«) erfolgen.

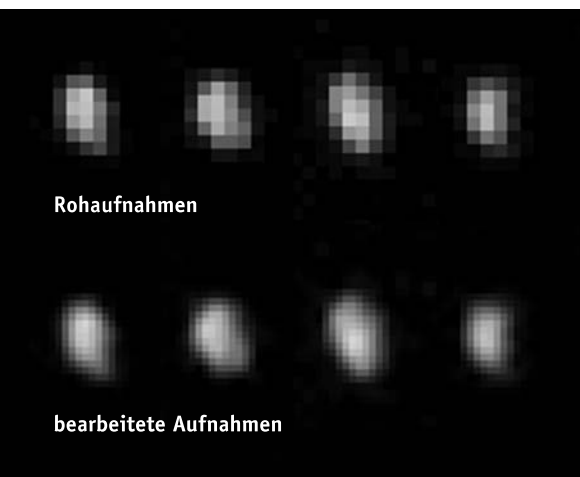
CASSINIS Reise ins äußere Sonnensystem

Nach diesem kleinen Exkurs in die Zukunft – die Pläne für CASSINI im Jahr 2004 werden weiter unten und im 2. Teil noch ausführlich behandelt – zurück ins Jahr 1999. Der Erdvorbeiflug verschaffte CASSINI eine genügend hohe Bewegungsenergie, so dass jetzt eine direkte Reise durch den Asteroidengürtel hindurch bis zum Jupiter möglich war.

Eine ausführliche Beschreibung des Jupiter-Vorbeiflugs von CASSINI findet sich in SuW 12/2001, S. 1048 ff. Er wurde bahnmmechanisch nicht unbedingt benötigt, verkürzte die Reisezeit zum Saturn aber um etwa zwei Jahre. Trotz knappem Budget wurde entschieden, Jupiter im Zeitraum zwischen dem 1. Oktober 2000 und dem 22. März 2001 intensiv zu beobachten. Dies bot eine sehr gute Gelegenheit, die Betriebssoftware und die Strategien für die Saturnbeobachtungen zu testen.

Der geringste Abstand zur Jupiterkugel wurde am 30. Dezember 2000 erreicht und betrug 9.72 Millionen km. Mit den beiden Kameras entstanden insgesamt 26 287 Aufnahmen. Zeitgleich befand sich noch die Sonde GALILEO in Nähe zum Jupiter. So konnten erstmals von zwei verschiedenen Standpunkten in Jupiternähe Beobachtungen von einem riesigen Vulkanausbruch auf dem Mond Io oder durch den Sonnenwind bedingter Veränderungen in der Magnetosphäre durchgeführt werden.

Ein technisches Problem mit einem »Gyro« (Schwungrad) des Lageregelungssystems erzwang für die Fernerkundungsinstrumente eine zehntägige Beobachtungspause kurz vor der größten Jupiterannäherung. Unmittelbar zuvor konnte noch der größte der äußeren Jupitermonde, Himalia, beobachtet werden. Mit 4.44 Millionen km Vorbeiflughöhe kam CASSINI diesem Mond so nahe wie



◀ Vier Aufnahmen des Jupitermonds Himalia, gewonnen in einem Abstand von wenigen Minuten. Der Phasenwinkel betrug 70°, der Mond Durchmesser vier bis sechs Pixel, was einer realen Größe von 120 km × 150 km entspricht. Da die Rotationsperiode von Himalia bis heute nicht genau bekannt ist, kann keine exakte Aussage darüber gemacht werden, wieviel Prozent der gesamten Oberfläche in den Aufnahmen erfasst wurden. Himalia ist der größte der äußeren Jupitermonde.

keinem anderen bekannten Körper im Jupitersystem. Kurz nach Wiederaufnahme der Beobachtungen wurde das bislang schärfste globale Bild des Jupiter gewonnen. Es zeigt bis zu 60 km kleine Details der Wolkenoberfläche.

CASSINI befand sich jetzt endgültig auf Saturnkurs, doch sollten nochmals $3\frac{1}{2}$ Jahre vergehen, ehe der Ringplanet erreicht würde. Diese Zeiten vergegenwärtigen, wie groß die Distanzen zwischen den Riesenplaneten im äußeren Sonnensystem sind im Vergleich zu den nach menschlichen Maßstäben auch schon riesigen Distanzen im inneren Sonnensystem, welche CASSINI/HUYGENS im Zeitraum von Monaten zurücklegen konnte. Tatsächlich ist die Erde im Mittel etwa 150 Millionen km von der Sonne entfernt, während Jupiter etwa eine dreiviertel Milliarde Kilometer und Saturn sogar eineinhalb Milliarden Kilometer von unserem Zentralgestirn trennen. Die zurückgelegte Strecke von der Erde zum Saturn, bei der CASSINI $2\frac{1}{4}$ Mal die Sonne umrundete, wird 3.5 Milliarden km betragen.

Die CASSINI-Orbit-Tour: Beobachtungsplanung

Die Zeit, obwohl zumeist eher ruhig für CASSINI/HUYGENS selbst, wurde auf der Erde intensiv für die Beobachtungsplanung der »Saturn Orbit Tour« genutzt. Hierfür wurden die 75 geplanten Umläufe von CASSINI um Saturn in 230 Segmente unterteilt, von denen jedes einen von sechs möglichen wissenschaftlichen Schwerpunkten und einen Meeting-Wochentag erhielt, an dem das jeweils zugeordnete »Target Working Team« über einige Jahre hinweg Telefonkonferenzen abhielt: Atmosphäre (Montag), Ringe (Mittwoch), Magnetfeld (Donnerstag), Titan (Freitag 14-tägig), andere (Eis-)Monde (Freitag im Wechsel mit Titan) oder »Cross Discipline« (Dienstag). Das »Cross Discipline Target Working Team« behandelte mit etwa 715 von 1461 »Tour-Tagen« den zeitlich umfangreichsten Teil der Tour, nämlich die Phasen, in

denen CASSINI sich fern vom saturnnächsten Punkt (also fern vom Periapsispunkt) der jeweiligen Umläufe aufhält. Andererseits hatte diese Gruppe aber die wenigsten Konflikte zu lösen, da die Zeiten in Saturnnähe, die von den anderen Gruppen bearbeitet wurden, für die Beobachtungen besonders wertvoll sind. Jedes »Target Working Team« besteht aus Vertretern der einzelnen wissenschaftlichen Instrumententeams sowie aus Mitarbeitern des JPL, die für übergeordnete Aspekte der wissenschaftlichen Planung und für die Raumsonden-Navigation zuständig sind. Das Jet Propulsion Laboratory (JPL) der US-Raumfahrtbehörde NASA liegt in Pasadena (Kalifornien); dort wurde CASSINI entwickelt und gebaut, und von dort aus wird die Sonde gesteuert. Auch das Projektmanagement unter der Leitung des Programmmanagers Robert Mitchell und des Projektwissenschaftlers Dennis Matson hat dort seinen Sitz.

■ **Die Planung im Detail:** In gewisser Weise lässt sich dieser erste Schritt des Planungsprozesses, der Mitte Januar 2004 abgeschlossen wurde, mit einem Kinderzimmer vergleichen, in dem viele Bauklötze liegen, die in eine geordnete Schlange gestellt werden müssen (übereinander legen oder ganz weglassen ist erlaubt, aber keine Verzweigungen). Auf CASSINI übertragen bedeutet dies, dass alle Beobachtungswünsche der beteiligten Wissenschaftlerteams (die »Bauklötze«: Saturn, Titanatmosphäre, Titanoberfläche, Eismonde, Ringe, Magnetfeldmessungen, Kamerawünsche, IR-Spektrometer, UV-Spektrometer, Staubdetektor, Magnetometerwünsche, und-und-und...) im Sommer 2001 in einer großen Datenbank, dem »CASSINI Information Management System«, gesammelt wurden, und dann nach und nach von den »Target Working Teams« sortiert und in eine konfliktfreie, ausführbare Reihenfolge gebracht wurden. Häufig können Beobachtungen verschiedener Instrumente parallel erfolgen.

Für fast jeden Zeitpunkt der Orbit Tour, in dem Beobachtungen ausgeführt werden, wurde ein wissenschaftliches Instrument als »prime« (Primär-)Instrument benannt; das zugehörige Wissenschaftlerteam ist für die Planung der Sondenausrichtung während der Beobachtung verantwortlich. (Es sei daran erinnert, dass alle Kameras und überhaupt alle Fernerkundungsinstrumente und auch die meisten Felder- und Partikelinstrumente fix an CASSINI angeschraubt sind, und dass jede Änderung der Beobachtungsrichtung durch eine Drehung der gesamten Sonde erfolgen muss.) Die anderen Beobachter sind währenddessen »rider« (»Reiter«) und ohne Einfluss auf die Ausrichtung ihrer Optiken und Sensoren.

Bei diesem ersten Planungsschritt wurden auch die Datenmengen für einzelne Beobachtungen festgelegt. Die prinzipielle Strategie bei CASSINI (von der ab und zu abgewichen wird) ist, dass täglich 15 Stunden lang Beobachtungen erfolgen und neun Stunden für die Datenübertragung zur Erde zur Verfügung stehen. Die beiden »Solid State Recorder« an Bord können zusammen fast vier Gigabit (Gb) an Daten speichern. Diese Datenmenge kann in der Regel in neun Stunden zur Erde übertragen werden, wenn eine der 70-Meter-Antennen in Goldstone (Kalifornien) oder Madrid (Spanien) zur Verfügung steht. Wenn nur mit 34-Meter-Stationen geplant wurde, kann etwa 1 Gb übertragen werden. Die 70-Meter-Stationen wurden für etwa 25 % der Mission beantragt, vor allem während der Mondvorbeiflüge und Periapsis-Passagen von CASSINI. Für die gesamte Orbit-Tour wird ein Datenvolumen von etwa 2.5 Terabit erwartet.

Trotz vier Jahren Tour und 75 Umläufen mussten viele Beobachtungswünsche gestrichen werden, da einfach nicht genug Zeit vorhanden ist. Teilweise waren Segmente bis zu fünffach »überbucht«, und so ist es verständlich, wenn schon heute über eine Missionsverlängerung bis zum Jahr 2010 nachgedacht wird. In die nominelle Tour konnten immerhin etwa 39 000 Beobachtungswünsche integriert werden.

Mitarbeiter der Freien Universität Berlin in Berlin-Lankwitz und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof sind für Teile der Pla-

▶ Ausschnitt aus der besten Jupiteraufnahme von CASSINI, die am 30. Dezember 2000, dem Tag der größten Annäherung, gewonnen wurde. Die Bildauflösung beträgt etwa 60 km/Pixel. Unten im Bild ist der Große Rote Fleck zu erkennen.



nungen der Kamerabeobachtungen und des Spektrometers VIMS zuständig. Das Visible and Infrared Mapping Spectrometer, für das eine Beteiligung am DLR in Berlin besteht, kann Spektren von Oberflächen und Atmosphären in einem Wellenlängenbereich von $0.4\ \mu\text{m}$ bis $5.1\ \mu\text{m}$ aufnehmen. Die Kamera, genannt »ISS« für »Imaging Sub-System«, besteht aus einer Telekamera und einer Weitwinkelkamera. Eine direkte Beteiligung am »Imaging Team« besteht an der Freien Universität Berlin. (Meine Aufgabe besteht in der Kamera-Beobachtungsplanung für die Monde Dione, Rhea, Iapetus und Phoebe, sowie später in der Datenauswertung aller Monde. Das erklärt, warum in diesem Artikel ein besonderes Augenmerk auf die Kamerabeobachtungen und auf die Monde gelegt wird.)

Die Telekamera »sieht« etwa 50 Mal so scharf wie das menschliche Auge. Ihr CCD-Sensor besteht aus 1024×1024 Bildpunkten (Pixel). Aus $100\,000\ \text{km}$ Distanz »füllt« eine Fläche von $600\ \text{m} \times 600\ \text{m}$ auf einer Oberfläche genau ein Pixel im CCD aus. Obwohl streng genommen nicht ganz korrekt, da Inhalte eines Pixels leicht in die Nachbarpixel »überlaufen« (Stichwort »point spread function«), wird nachfolgend von »Bildauflösung« die Rede sein, wenn die geometrische Größe eines auf eine Oberfläche projizierten Bildpunktes gemeint ist (hier im Beispiel also $600\ \text{m}/\text{Pixel}$).

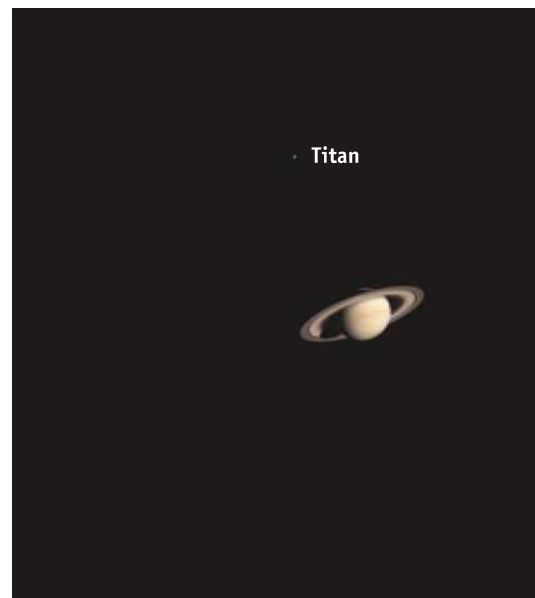
Weitere deutsche Beteiligungen an CASSINI/HUYGENS bestehen unter anderem

▼ Die Flugbahn von CASSINI in den Jahren 2004 bis 2008. Links: Ansicht auf den Nordpol des Saturn, rechts ein Blick auf den Äquator.

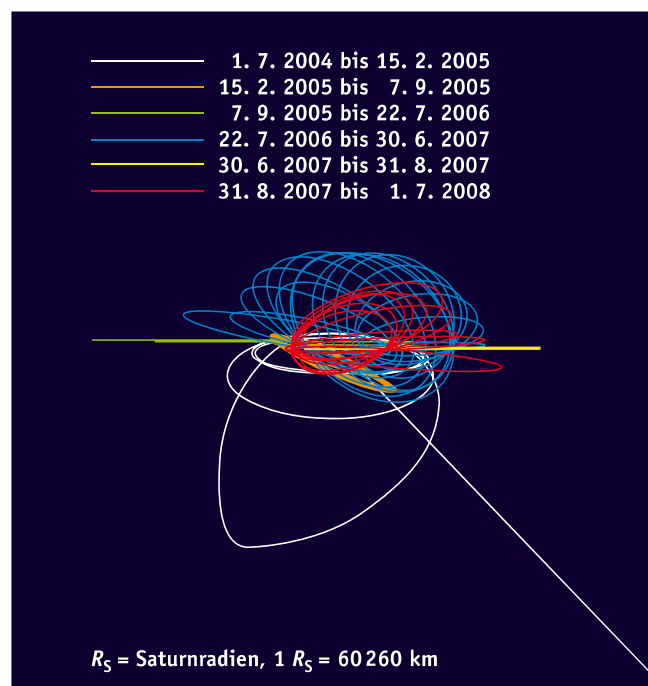
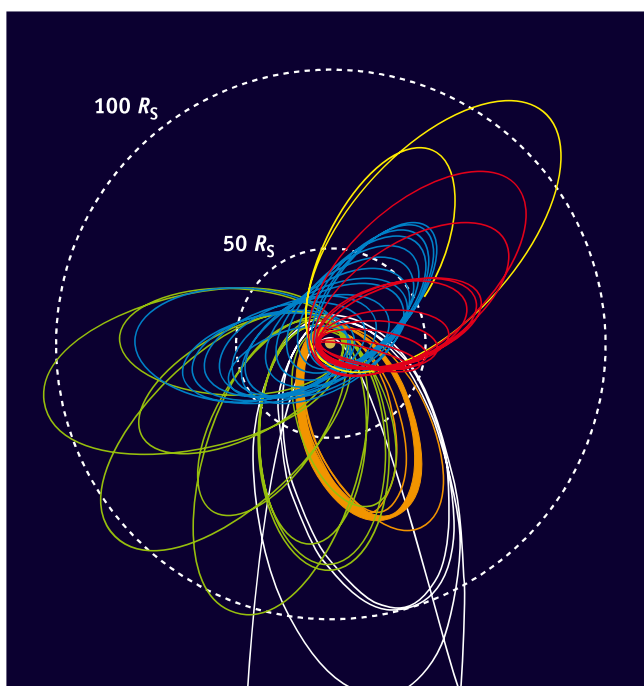
am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, wo der Staubbildetektor entwickelt wurde, am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau (»Magnetic Field Imaging Instrument« und HUYGENS-Kamera), sowie an den Universitäten in Stuttgart (Ultraviolett-Spektrometer), Bonn (HUYGENS »Doppler Wind Experiment«), Köln (Magnetometer und »HUYGENS Atmospheric Structure Instrument«) und Braunschweig (Magnetometer). Das DLR in Berlin ist außer an VIMS auch noch am Ultraviolett-Spektrometer und am Staubbildetektor beteiligt.

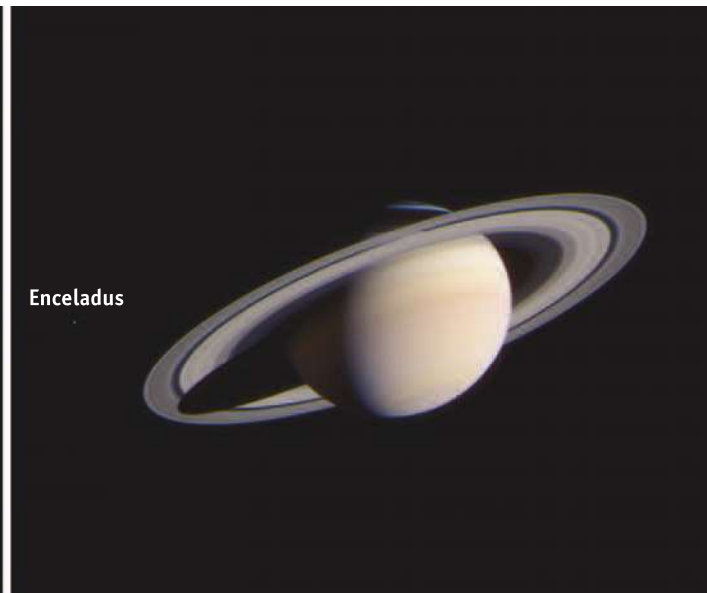
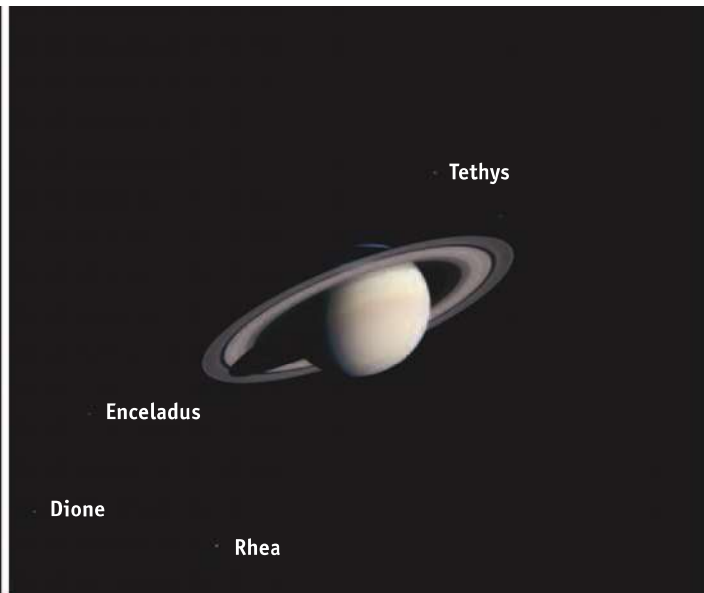
■ **Der Feinschliff.** Der zweite Planungsschritt, der gegenwärtig andauert, beinhaltet die genaue softwaredefinierte Festlegung der Sondenausrichtung und die Zusammenfassung aller Segmente in insgesamt 41 Sequenzen. Außerdem werden hier Irrtümer aus dem ersten Planungsschritt korrigiert. Die erste Sequenz, S01 genannt, beginnt am Abend des 14. Mai 2004, die letzte, S41, endet am 30. Juni 2008. Zur Zeit (Stand Juni 2004) erfolgt die Planung für die Sequenzen S31 und S32, die zwischen 16. Mai 2007 und 12. August 2007 ausgeführt werden sollen.

15 Wochen vor dem »Uplink«, dem Hochfunken der Kommandosequenzen, beginnt der letzte »Feinschliff«. Ziel ist, nach einem minutiösen Zeitplan alle notwendigen Informationen aus dem zweiten Planungsschritt in ein für die Raumsonde verdauliches Computerfile zu packen. Dieses wird dann wenige Tage vor Beginn der Ausführung der jeweiligen Sequenz hochgefunkt. Es gibt CASSINI einige Wochen lang (für die Länge der Sequenz)



Anweisungen, was die Sonde zu welchem Zeitpunkt zu tun hat. Jetzt müssen auch die Kommandofiles der einzelnen Instrumenten-Teams zum JPL übertragen werden, welche die Kameras, Spektrometer, usw. kommandieren. Wann sich der Verschluss der Kamera öffnet, spielt ja für die Ausrichtung der Sonde keine Rolle, obwohl dies natürlich nicht zu einem Zeitpunkt geschehen soll, in dem die Sonde gerade eine Drehung ausführt, sonst würden die Bilder nämlich heftig verschmiert und wären nicht zu verwenden. Tatsächlich sind Raumsondenausrichtung und Instrumentkommandierung zwei ganz verschiedene »Welten«, die letztlich nur durch Synchronisation durch die Borduhr sinnvoll in Einklang gebracht werden. Zurzeit wird die Sequenz S01 an Bord ausgeführt, S02 bis S04 befinden sich in der Vorbereitung.





CASSINI-Orbit-Tour: Die Flugroute

Die Umläufe von CASSINI um Saturn sind komplizierter als alle bislang im äußeren Sonnensystem geflogenen Bahnen. Ein Grundprinzip besteht darin, dass sich CASSINI immer auf einer »Titan-Rückkehrbahn« befinden muss, da Titan der einzige Mond ist, der aufgrund seiner Masse durch den Swing-by-Effekt eine signifikante Bahnänderung bewirken kann. Das heißt, nach einer endlichen Anzahl von Runden um Saturn muss CASSINI irgendwann wieder in Titannähe kommen, um eine neue, andere Bahn einschlagen zu können. Ohne Titan-Vorbeiflüge wären nur sehr geringe Bahnveränderungen machbar. Die ausgewählte »CASSINI Orbit Tour« enthält zwischen Oktober 2004 und Mai 2008 insgesamt 45 gezielte Titan-Vorbeiflüge.

Möglichst unterschiedliche Umläufe sind aber ein primäres Ziel, um eine optimale wissenschaftliche Ausbeute zu erzielen. So sind beispielsweise Bahnen in der Äquatorebene des Saturn günstig für Beobachtungen der Monde, da deren Bahnen zumeist genau in der Äquatorebene liegen und somit CASSINI nur bei solchen Bahnen häufig in ihre Nähe gelangen kann. Für Beobachtungen der Pole Saturns oder der Ringe hingegen sind geneigte Bahnen wichtig, das heißt, die Flugbahnebene CASSINIS liegt nicht mehr in der Äquatorebene Saturns, in der sich auch das weit ausgedehnte, aber extrem dünne Ringsystem befindet. Magnetfeldmessungen bevorzugen einerseits Bahnen über die Pole Saturns, andererseits auch Bahnen, die die Sonde weit von Saturn über dessen Nachtseite wegtragen. Die Nachtseite hingegen ist zwar für Gewitterbeobachtungen, nicht aber für Atmosphärenstudien der Windbewegungen günstig. Für Langzeit-Wetterbeobachtungen werden weite Umlaufbahnen

über der Tagseite des Planeten bevorzugt. Möglichst oft soll von CASSINI aus gesehen die Erde hinter Saturn, den Ringen oder Titan verschwinden, so dass die atmosphären- oder ringpartikelbedingte Veränderung eines Radiosignals zur Erde studiert werden kann. »Sonnenfinsternisse«, also ein Verschwinden der Sonne hinter Saturn, sind ebenso erwünscht wie Sternbedeckungen. Zahlreiche Titan-Vorbeiflüge sind nützlich, aber sie sollen auch viele verschiedene Regionen auf der Oberfläche abdecken und von den Beleuchtungsbedingungen, der Vorbeiflughöhe und vielem anderem her für die Kameras und/oder andere Instrumente günstig sein. Schließlich sollen Bereiche im Saturnsystem, in denen sich gefährliche Teilchen aufhalten könnten, vermieden werden, und selbst irdische Feiertage dürfen nicht zu oft mit komplexen Manövern zusammenfallen. (Einmal Weihnachten und Thanksgiving wegen CASSINI ausfallen zu lassen mag gerade noch angehen – aber vier Jahre lang hintereinander?!)

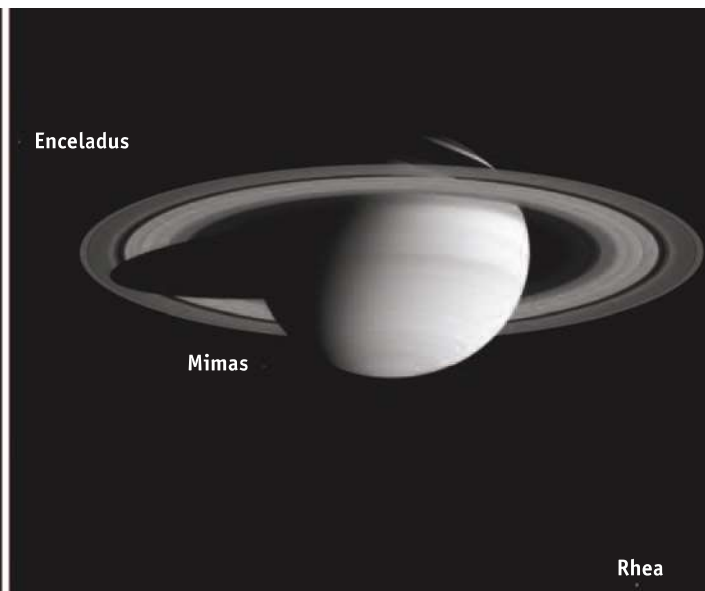
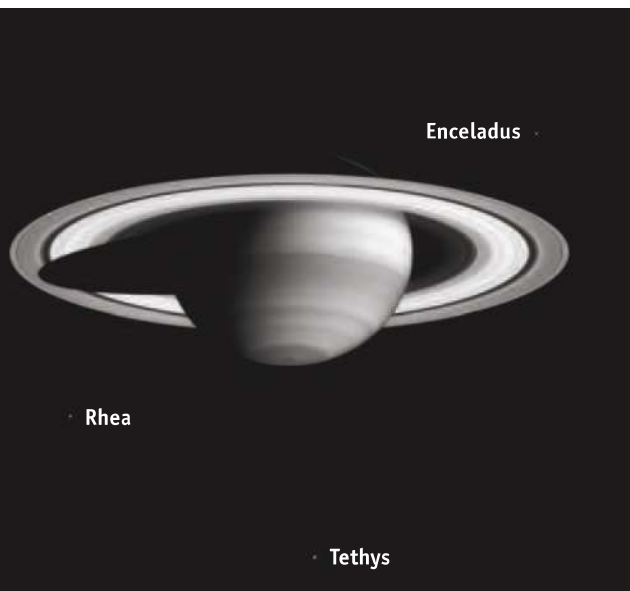
Die Annäherung

Zur Zeit (Frühjahr 2004) nähert sich CASSINI/HUYGENS Saturn über dessen »Morgenseite«. Die Sonde befindet sich etwa in der Ekliptikebene (der Ebene im Raum, die durch die Erdbahn um die Sonne definiert wird), und da Saturns Äquatorebene um 26° gegen die Ekliptik geneigt ist, erfolgt die Ankunft auf einer geneigten Bahn. Bahnmechanisch ist das ein großes Glück, denn so wird es möglich sein, CASSINI/HUYGENS bis auf 20 000 km an die Wolkenoberfläche Saturns heranzuführen, ohne dass die Ringe im Weg sind. Je näher CASSINI an das Schwerzentrum des Saturnsystems herangeführt werden kann, umso effektiver ist das Abbremsmanöver mit dem Haupttriebwerk, das

▲ CASSINIS Anflug auf Saturn. Von links nach rechts: Am 21. 10. 2002, am 9. 11. 2003 und am 9. 2. 2004. Nächste Seite: Saturn am 16. 2. und am 29. 2. 2004. Die bei der jeweiligen Annäherung beobachteten Monde sind in den Bildern angegeben. (Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute)

einen Schub von 445 Newton entwickeln kann. Es wird über anderthalb Stunden lang CASSINI/HUYGENS in den frühen Morgenstunden des 1. Juli 2004 um etwa 2200 km/h verlangsamen. Diese Abbremsung reicht aus, um CASSINI/HUYGENS im Schwerefeld Saturns gefangen zu halten. Wenige Stunden vor und wenige Stunden nach der größten Annäherung durchstoßt CASSINI die Ringebene. Obwohl dies in einem Bereich außerhalb des Ringsystems geschieht, in dem keine gefährlichen Teilchen erwartet werden, wird vorsichtshalber die Hauptantenne CASSINIS in Flugrichtung gedreht, sie dient als Schutzschild für die direkt darunter angebrachte Elektronik.

Die Periode des ersten Umlaufs beträgt 118 Tage. Im Sommer und Herbst 2004 wird die Flugbahn von CASSINI/HUYGENS zunächst so geändert, dass die Sonde in eine Äquatorbahn überführt wird, die im Sommer 2005 – jetzt bereits ohne HUYGENS – erreicht wird. Anschließend wird die »Apsidenlinie«, d. h. die Verbindungslinie zwischen Periapsis (saturnnnächstem Punkt) und Apoapsis (saturnnfernstem Punkt der CASSINI-Bahn), von Norden aus gesehen im Uhrzeigersinn gedreht, so dass sich CASSINI bald den überwiegenden Teil seiner Bahn über der Nachtseite des Planeten aufhalten wird. So werden Messungen im weit ausschweifenden Teil des Magnetfeldes möglich. Zwischen Juni 2006 und Juni 2007 findet der so genann-



te »180°-Transfer« statt. Bei diesem Manöver, in dessen Verlauf sehr viele Titan-Vorbeiflüge stattfinden, ist es möglich, die Apsidenlinie sehr stark zu drehen, obwohl sich die Raumsonde nicht in einer äquatorialen Bahn befindet. Im Sommer 2007 soll die Apoapsis der Bahn von CASSINI dann über der Abendseite Saturns liegen. Die Bahn wird erneut äquatorial, was für einige Vorbeiflüge an mehreren Monden sehr günstig ist. Ab Herbst 2007 schließlich wird die Bahnneigung immer weiter angehoben, die Bahnperioden werden immer kürzer, und die Apsidenlinie wandert weiter gegen den Uhrzeigersinn, bis sie fast über dem Mittagspunkt auf Saturn liegen wird. Die Umlaufdauer wird im Juni 2008 dann nur sieben Tage betragen, und die Bahnneigung soll bis auf 76° angehoben werden.

Die Beobachtungen von CASSINI im Jahr 2004

Seit dem 6. Februar liefert CASSINI täglich Daten und Aufnahmen, zunächst noch aus großer Distanz. An diesem Tag betrug der Abstand zum Ziel 70 Millionen km, und Saturn passte bequem mitsamt seinem Ringsystem in das Bildfeld der Kamera. Regelmäßige Atmosphärenbeobachtungen und Bildsequenzen für eine Suche nach neuen Monden zwischen dem Ringsystem und der Bahn des Mondes Hyperion waren ein Aufgabenfeld für die ISS-Kamera in diesem Teil der Mission. Zusätzlich bildeten Beobachtungen der Saturnumgebung mit dem Ultravio-

lett-Spektrometer zwecks Suche nach sehr dünnem Wasserstoffgas sowie Beobachtungen der Monde mit der Kamera zu Navigationszwecken einen weiteren Schwerpunkt der Aktivitäten von CASSINI. Diese Beobachtungen der Monde sollen übrigens weitgehend kontinuierlich über die gesamte Lebenszeit von CASSINI durchgeführt werden.

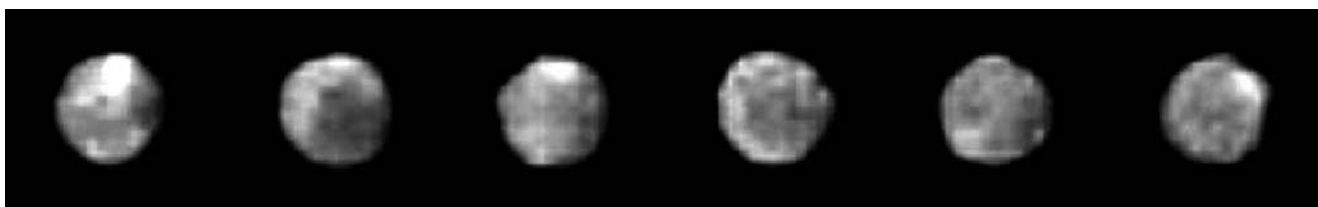
Am 3. April, in 44,5 Millionen km Distanz, begannen regelmäßige ISS-Beobachtungen der Titan-Atmosphäre, und die Beobachtungen der Saturn-Atmosphäre und des Ringsystems wurden intensiviert. Titan ist in dieser Distanz bereits als Scheibchen von 20 Bildpunkten Durchmesser erkennbar, und die Bildauflösung ist mit etwa 270 km/Pixel vergleichbar mit der Auflösung der besten Bilder des Weltraumteleskops HUBBLE. Seit dem 2. April werden die Saturn-Atmosphären-Aufnahmen als so genannte 1×3-Mosaik ausgeführt, weil die Ringe über das Bildfeld der Telekamera hinausragen; ein Umstand, der sich nie mehr ändern wird. Die Suche nach Monden wurde ebenso fortgeführt wie die Vermessung von Bahnen schon bekannter Monde. Das letzte Saturnbild dieser Serie wurde am Abend des 12. Mai aus 26 Millionen km Distanz gewonnen, die Bildauflösung betrug rund 155 km/Pixel, der Durchmesser der Saturnkugel 690 × 780 Bildpunkte, und die »Spannweite« der Ringe 1800 Pixel.

Am 14. Mai um 20:40 Uhr MESZ begannen zur gleichen Zeit die Sequenz »S01« und der Orbit »0«. Für einige Tage

standen hier die UV-Wasserstoffuntersuchungen und die Suche nach Monden im Ringsystem im Vordergrund, während die Saturn-Atmosphärenbeobachtungen der vergangenen Wochen beendet wurden. Am 20. Mai beginnt eine intensive Kampagne zur Beobachtung der Titanatmosphäre, die Bildauflösung ist jetzt bereits doppelt so hoch wie die besten Aufnahmen des HST. Die Kampagne wird bis Mitte Juni andauern und vielleicht auch Teile der Oberfläche zeigen.

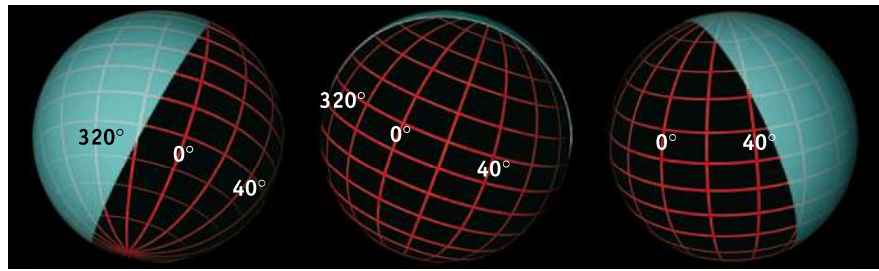
Erste Titan-Aufnahmen mit dem direkten Ziel, die Oberfläche zu beobachten und die besten Filterkombinationen hierfür zu testen, sind für den 10. Juni vorgesehen. Die Bildauflösung soll 78 Kilometer pro Bildpunkt betragen und damit mehr als dreimal höher sein als in HST-Aufnahmen. Das beobachtete Gebiet wird auf der saturnzugewandten Seite Titans liegen. Für den selben Tag sind auch erste Aufnahmen des Mondes Phoebe geplant, in denen dieser Mond in ungekannter Genauigkeit über einen Zeitraum von fast 12 Stunden 118 Mal photographiert werden soll. Die Eigenrotationsperiode von Phoebe beträgt 9 Stunden 16 Minuten und 25 Sekunden, so dass mehr als eine komplette Umdrehung erfasst werden kann.

▼ Bilder des äußeren Saturnmondes Phoebe, aufgenommen von VOYAGER-2 am 5. September 1981 aus über 2 Millionen km Entfernung.



Phoebe-Vorbeiflug am 11. Juni

Das wichtigste Ereignis der CASSINI-Mission vor der Ankunft wird zweifellos der gezielte Vorbeiflug am äußeren Mond Phoebe sein. Phoebe, ein halbwegs kugelförmiger Körper mit Durchmessern zwischen 210 und 230 km, kreist in etwa 13 Millionen km Distanz mit einer Umlaufperiode von 550 Tagen gegenläufig um den Saturn. Die Bahnebene dieses Mondes liegt günstigerweise fast in der Ekliptikebene, nur deshalb hat CASSINI überhaupt eine Chance für einen nahen Vorbeiflug. Die Ankunft CASSINIS am Saturn wurde schon vor vielen Jahren auf den 1. Juli 2004 gelegt, damit eine Begegnung mit Phoebe ermöglicht wird. Zunächst betrug die nominelle Distanz 57 000 km, vor einigen Jahren wurde die Anflugbahn aber so geändert, dass CASSINI Phoebe am 11. Juni 2004 gegen 21:30 Uhr MESZ in nur 2000 km Abstand überfliegen wird. Die besten Phoebe-Bilder, von VOYAGER-2 am 5. September 1981 aus über zwei Millionen km Distanz aufgenommen, zeigen ein leicht unregelmäßig geformtes Scheibchen von gerade mal elf Bildpunkten Durchmesser. Dies entspricht einer Bildauflösung von 20 km/Pixel. Mit den CASSINI-Beobachtungen, die mehr als zwei Rotationen abdecken, soll Phoebe komplett mit einer Auflösung von 2



km/Pixel, zum größten Teil sogar 1 km/Pixel oder besser abgelichtet werden. Die höchstauflösenden Bilder sollen bis zu 12 m/Pixel erreichen und damit fast 2000 Mal so scharf wie die Daten von VOYAGER sein. Für die ISS-Kamera sind 398 Aufnahmen geplant, 939 Megabit steht für das ISS an Datenvolumen zur Verfügung. 51 Bilder könnten eine Auflösung von besser als 100 m/Pixel erreichen. Die höchstauflösenden Infrarot-Spektrometerdaten könnten bis zu $1/2$ km/Bildpunkt erreichen.

Die Beobachtungen wurden in drei Gruppen unterteilt: Anflug, höchste Auflösung und Abflug. Dazwischen sind jeweils Radar-Beobachtungen platziert, die ja wegen der anderen Orientierung der Sonde zeitgleich keine Kamera- oder Spektrometer-Aufnahmen zulassen. Als »Prime-Instrumente« wechseln sich jeweils die ISS-Kamera und das Ferninfrarot-Spektrometer CIRS ab. Sollten die Beobachtungen gelingen, wird Phoebe für viele Monate der besterforschte Saturnmond sein.

»Pre-SOI«, »post-Phoebe«

Nach dem Phoebe-Vorbeiflug werden die Titan-Atmosphären- und die UV-Wasserstoffbeobachtungen fortgesetzt (siehe auch S. 12). Am 17. Juni folgt eine zweite Titan-Oberflächen-Beobachtung. Sie soll eine helle Struktur auf der Bugseite zeigen, die Bildauflösung ist auf 46 km/Pixel angewachsen.

Die letzten Tage vor dem 22. Juni beinhalten ein sehr komplexes Beobachtungsprogramm. Nähere Details hierzu finden sich unter www.suw-online.de. Neben Saturnbeobachtungen im »Methanlicht« folgen zwei weitere Titan-Oberflächenbeobachtungen, die auch die Landestelle der HUYGENS-Sonde im Bildfeld haben werden, allerdings nur schräg bzw. unter ungünstigen Beleuchtungsbedingungen. Spektrometer-Beobachtungen der Saturnringe und Atmosphäre versuchen, die Zusammensetzung dieser Körper im Detail zu erkunden, und eine 16,5-stündige Detailbeobachtung der Ringe dient der Suche nach versteckten, kleinen Monden im Ringsystem. Da der äußere Rand der Ringe etwa 16 Stunden für eine Saturnumkreisung benötigt; müssten in diesem Zeitraum alle bislang unentdeckten und schon entdeckten Monde mindestens

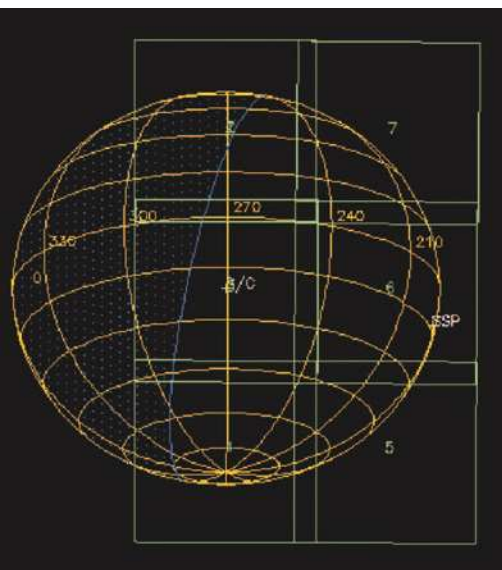
▲ Fluggeometrie beim Phoebe-Vorbeiflug. Beim Anflug wird die südliche Hemisphäre im Blickfeld sein, der Phasenwinkel beträgt 87°. Beim Abflug ist die Nordhemisphäre unter einem Phasenwinkel von 93° zu sehen. Die größte Annäherung erfolgt über der beleuchteten Seite.

einmal durch das Bildfeld der Kamera huschen. Obwohl die Bildauflösung nur 39 km/Pixel beträgt, sollte es möglich sein, kleine, nur wenige Kilometer große Monde nachzuweisen – wenn es sie denn gibt.

Die größeren »Eismonde« Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Hyperion und Iapetus werden ebenfalls beobachtet. Die Bildauflösung wird zwischen 54 und 36 km/Pixel liegen; die Monde werden also (noch) als nur kleine Scheibchen von etwa 10 bis 38 Bildpunkten Durchmesser im Bildfeld der Kamera erkennbar sein. Titan hingegen wird in der letzten Aufnahme, die in den Morgenstunden des 22. Juni gewonnen werden soll, bereits auf 146 Bildpunkte »angewachsen« sein.

Die Sequenz »S02« beginnt am 19. Juni, und am Morgen des 22. Juni stellt CASSINI alle Fernerkundungsbeobachtungen ein. Die Sonde soll in den letzten Tagen bis zum Einschuss in die Umlaufbahn nicht mehr durch »unnötige« Aktivitäten gefährdet werden. Nur 5,9 Millionen km oder etwa 208 Stunden trennen die Sonde noch von ihrem Ziel. □

Wie der Einschuss ablaufen soll und was bis zum Abwurf der HUYGENS-Sonde im Dezember geplant ist, wird im 2. Teil in der nächsten SuW-Ausgabe beschrieben.



▲ Erstes von vier geplanten, sehr hochauflösenden Bildmosaiken von Phoebe, bestehend aus sechs Aufnahmen. Aufnahmezeitpunkt: Etwa 40 min. vor der größten Annäherung; die Bildauflösung soll 80 bis 100 m pro Pixel betragen. Der Vorbeiflug erfolgt am 11. Juni 2004. Gezeigt sind die Bildausschnitte der Telekamera für den Fall, dass CASSINI/HUYGENS auf der vorausberechneten Flugbahn an Phoebe vorbeifliegt.



Dipl.-Ing. Tilmann Denk studierte Luft- und Raumfahrttechnik in Stuttgart. Seit 2003 arbeitet er an der FU in Berlin-Lankwitz in der Arbeitsgruppe von Prof.

Gerhard Neukum. Zur Zeit ist er hauptsächlich mit der Planung der CASSINI-Beobachtungen für die Monde beschäftigt.