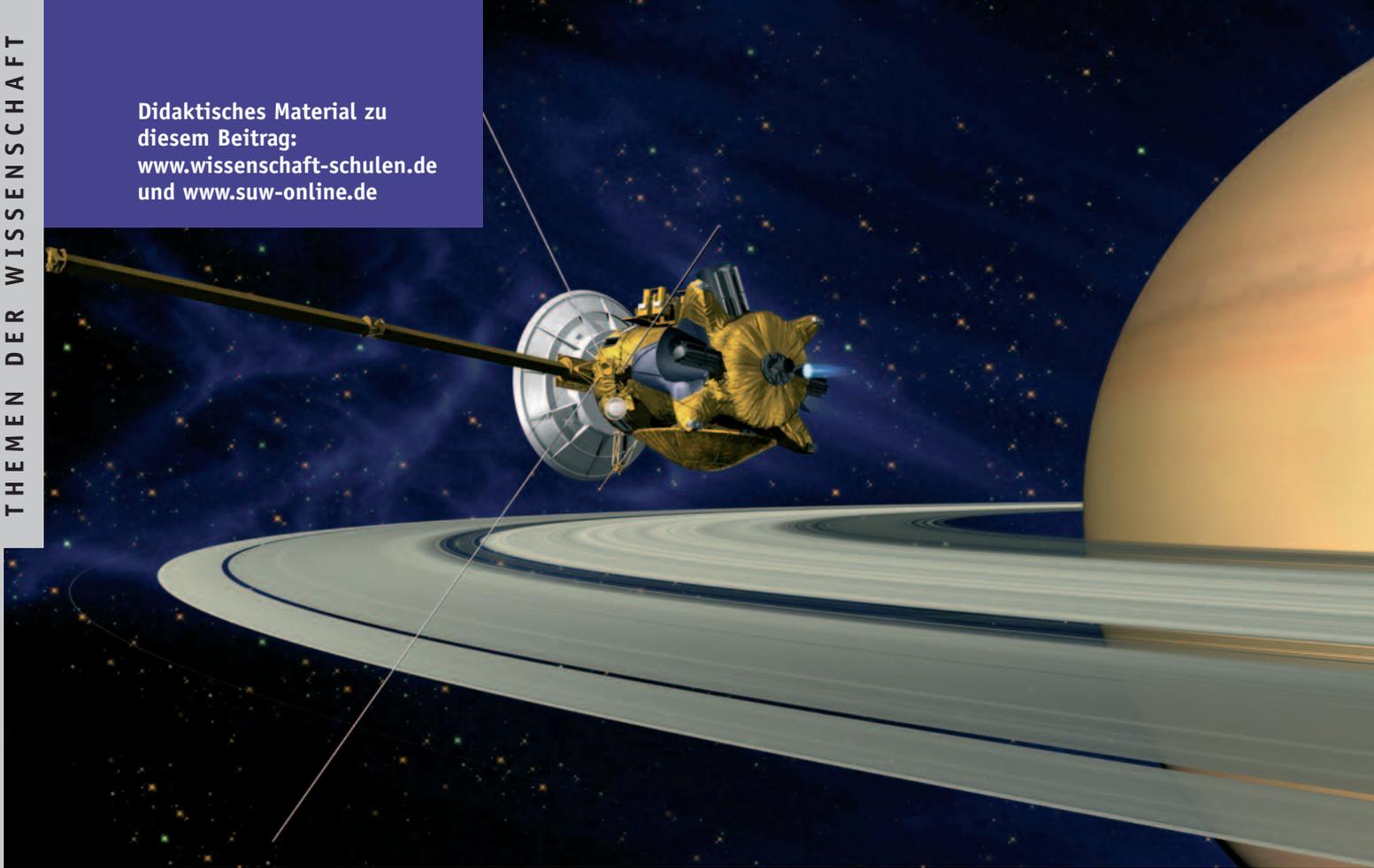


Didaktisches Material zu diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de
 und www.suw-online.de



Die Raumsonde CASSINI erreicht Saturn

Teil 2: Der Eintritt in die Umlaufbahn

VON TILMANN DENK

In diesen Tagen erreicht die Raumsonde CASSINI nach fast siebenjährigem Flug den Ringplaneten Saturn. Dieser Teil der Artikelserie beschreibt das Einschwenken in die Saturnumlaufbahn und die wissenschaftlichen Untersuchungen im Saturnsystem bis zur Abtrennung der Landesonde HUYGENS im Dezember.

Die Mission der Saturnsonde CASSINI strebt Ende Juni einem ersten Höhepunkt entgegen, das extrem wichtige Manöver zum Eintritt in eine Umlaufbahn um den Gasriesen steht bevor. Die Nerven der Missions-Kontrollleure in der Bodenstation am Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien sind jetzt aufs Äußerste gespannt.

1. Juli 2004: Ankunft am Saturn

Das wohl kritischste Manöver der Mission nach dem Start erfordert eine minutiöse Vorbereitung. Der Einschuss in die Umlaufbahn muss gelingen, es gibt keine Möglichkeit der Wiederholung. Nur 26 Minuten vor der Triebwerkszündung,

in einer Distanz von 98 000 km zur Wolktoberfläche Saturns und knapp 7000 km außerhalb der Bahnen der inneren Monde Janus und Epimetheus, durchstößt CASSINI/HUYGENS die Ringebene von Süden nach Norden. Lag während der gesamten Anflugphase die beleuchtete Seite des Ringsystems im Blickfeld CASSINIS, so befindet sich die Sonde jetzt über der unbeleuchteten Seite. Die anschließend verbleibende Zeit reicht gerade aus, um die Sonde umzudrehen, so dass die Triebwerke in Flugrichtung weisen.

Um 3:12 MESZ beginnt nominell die Zündung dieses »SOI« oder »Saturn Orbit Insertion« genannten Manövers, und etwa 98 Minuten später soll CASSINI/HUY-

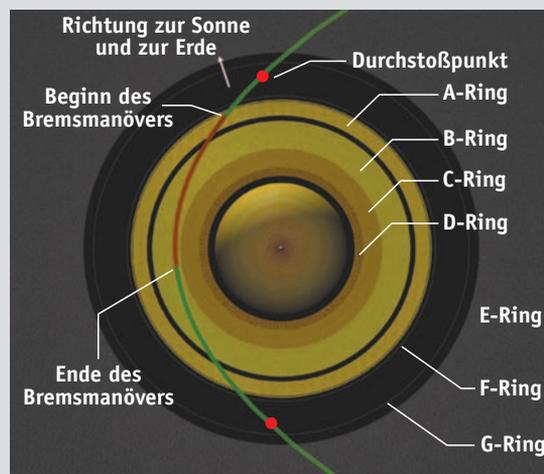
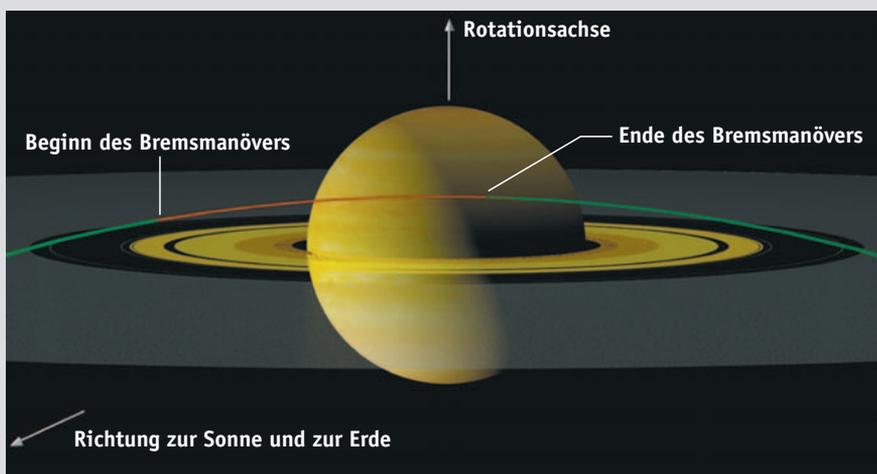
GENS zu einem weiteren Saturnsatelliten geworden sein. Aufgrund negativer Erfahrungen der NASA mit Raumsonden, die während wichtiger Manöver planmäßig Funkstille verordnet bekommen hatten, sich aber anschließend nie mehr meldeten, soll die kleine Rundstrahlantenne, die an der Spitze der Hauptantenne platziert ist, während des gesamten Abbremsmanövers ein Trägersignal senden. Ursprünglich war sogar verlangt worden, dass die große Antenne die gesamte Zeit zur Erde ausgerichtet bleibt und Telemetriedaten sendet. Dies hätte aber einen unakzeptabel hohen Treibstoffverbrauch bedeutet, da die Düsen nicht mehr exakt in Flugrichtung Schub geben könnten, und ein Kontakt über die kleine Antenne wurde als Kompromiss akzeptiert.

Eingriffe von der Erde aus sind im Falle einer Fehlfunktion sowieso unmöglich, da die Signale zu diesem Zeitpunkt 84 Minuten benötigen, um das Kontrollzentrum zu erreichen. Am 1. Juli um 1:27 MESZ erfolgt also die Umschaltung von

◀ Künstlerische Darstellung der Ankunft von CASSINI am Saturn. Anders als hier dargestellt wird der Einschuss in die Umlaufbahn aber über der unbeleuchteten Ringseite erfolgen. (Bild: D. Seal/JPL)

▶ Saturn aus 38.5 Millionen Kilometer Abstand, aufgenommen von CASSINI am 16. April 2004. Es lassen sich viele Einzelheiten in der Wolkendecke des Ringplaneten erkennen. Das Bild entstand im Licht des Methanfilters (727 nm). (Bild: NASA/JPL/Space Science Institute)

▼ Die Anfluggeometrie von CASSINI bei Saturn am 1. Juli 2004. Die Ringebene wird zwischen dem F- und dem G-Ring durchstoßen.



der Hauptantenne zur kleinen Antenne. Um 2:18 MESZ beginnt CASSINI/HUYGENS eine zehnminütige Drehung. Um die Sonde vor möglichen kleinen Staubteilchen während des Durchstoßens der Ringebene zu schützen, weist im Verlauf dieses kurzen Flugabschnitts die Hauptantenne in Flugrichtung.

Der Kontakt zur Erde ist kurzzeitig unterbrochen. Um 2:56 MESZ dann eine erneute, ebenfalls mit zehn Minuten Dauer veranschlagte Drehung, die CASSINI/HUYGENS in die endgültige Position für das SOI-Manöver bringt. Sechs Minuten bleiben noch, bis um 3:12 MESZ eines der beiden Triebwerke mit der Arbeit beginnt. Die Radiosignale enthalten zwar keine Telemetriedaten, mit denen etwas über den Zustand der Sonde ausgesagt werden könnte, aber der Doppler-Effekt, also eine durch die Geschwindigkeitsänderung bedingte Änderung der Frequenz des Trägersignals, kann gemessen werden (vgl. auch SuW 11/2003, S. 34 ff.). Um 3:35 MESZ verschwindet CASSINI von

der Erde aus gesehen hinter den Ringen, so dass die Funkverbindung wahrscheinlich vollständig unterbrochen sein wird. Für den Zeitraum, in dem sich der A- und der B-Ring zwischen CASSINI und der Erde befinden, wird daher kein Signalempfang erwartet. Für die Dauer von etwa fünf bis zehn Minuten, in denen CASSINI durch die Cassinische Teilung der Ringe hindurchsenden kann, kann aber der Fortschritt des Manövers weiter beobachtet werden.

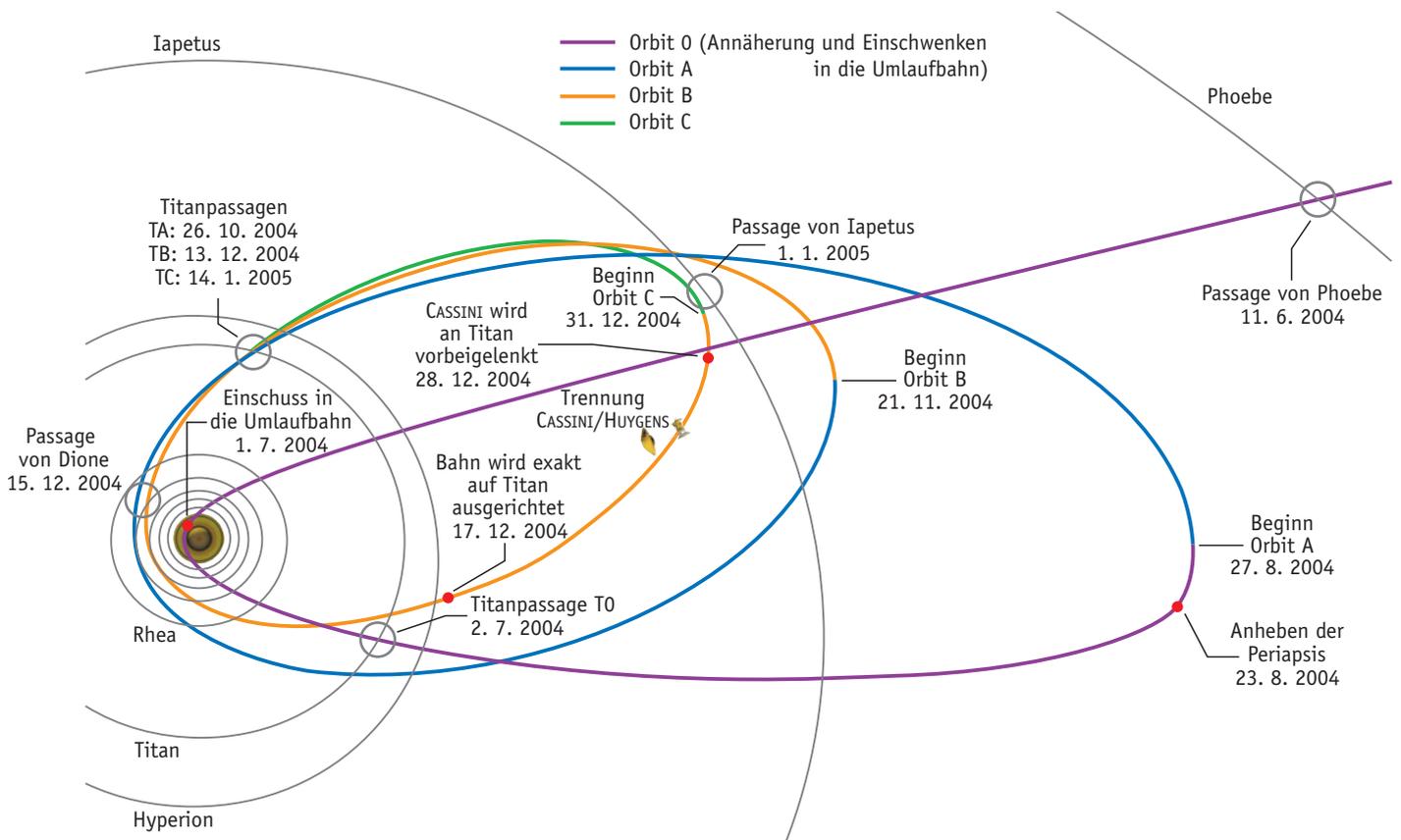
Gegen 4:29 MESZ, also erst etwa 77 Minuten nach Beginn der Zündung, ist CASSINI/HUYGENS so weit abgebremst, dass die Sonde das Schwerefeld des Saturn nicht mehr verlassen kann. Erst wenige Minuten später, um 4:36 MESZ, erreichen die Signale, die zum Zeitpunkt der Triebwerkszündung ausgesandt wurden, die Erde. In den nachfolgenden 98 Minuten müsste die Flugleitkontrolle eine kontinuierliche Geschwindigkeitsänderung messen können. Am JPL in Pasadena (Kalifornien) wird das Manöver am Abend des 30. Juni Ortszeit verfolgt, und viele

am Projekt beteiligte werden sich im Rahmen einer »Family and Friends Party« zur Feier des Ereignisses zusammenfinden.

Die ersten Signale

Wenn alles gut verläuft, wird CASSINI/HUYGENS also bereits von Saturn eingefangen sein, bevor wir vom Manöverstart erfahren. Um 4:39 MESZ erreicht die Sonde den saturnnächsten Punkt der Flugbahn. 20530 km über den Wolken nähert sich das SOI-Manöver seinem Ende. Nominell um 4:50 MESZ – allerspätestens um 4:58 MESZ – wird das Triebwerk automatisch gestoppt. CASSINI/HUYGENS ist jetzt um 2250 km/h langsamer geworden und befindet sich auf seiner ersten Saturnumlaufbahn. Drei Minuten später wird die Abdeckung der Haupttriebwerke geschlossen, sechs Minuten später ist die Hauptantenne von CASSINI wieder exakt zur Erde ausgerichtet.

Zwischen 6:12 und 6:22 MESZ werden Signale, die am Ende des SOI ausgesandt wurden, auf der Erde eintreffen. Schon



▲ Die Flugroute von CASSINI/HUYGENS von der Ankunft im Saturnsystem am 1. Juli bis zur Huygens-Mission beim Titan-Vorbeiflug »Tc« am 14. Januar 2005.

lange zuvor hat aber bereits die wissenschaftliche Forschung mit den Fernerkundungsinstrumenten im Saturnsystem begonnen (die Felder- und Partikelinstrumente sammelten schon die gesamte Zeit über Daten – eine so geringe Nähe zu Saturn ist auch für sie eine einzigartige Gelegenheit). Die Position hoch über den Ringen, so nah wie nie zuvor oder später während der Mission, ist zu wichtig, als dass diese Beobachtungsmöglichkeit ausgelassen werden dürfte. Um 5:06 MESZ endete die sogenannte »Critical sequence«, die am 23. Juni um 2:00 MESZ begonnen hatte. Sie hatte dafür zu sorgen, dass das SOI-Manöver nicht nur ordnungsgemäß abläuft, sondern auch, dass das Abbremsmanöver von keiner noch so bedeutenden oder gar gefährlichen möglichen technischen Störung abgebrochen würde. Mit dem Ende der »Critical Sequence« wird auch wieder von der kleinen auf die große Antenne umgeschaltet. Das Wichtigste ist geschafft, das Beste kommt noch.

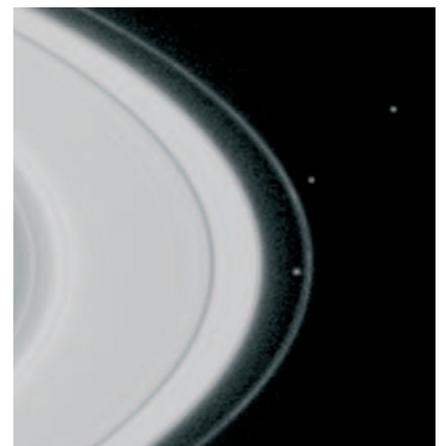
Die Ringe »in greifbarer Nähe«

Schon eine Minute später dreht sich CASSINI/HUYGENS erneut von der Erde weg, um mit den Beobachtungen der Ringe zu beginnen. (Die Saturnatmosphäre kann

leider nicht fotografiert werden, weil sich die Sonde jetzt über der Nachtseite Saturns aufhält.) Auf das ursprünglich vorgesehene »Phone home«, mit dem über die Hauptantenne ein kurzer Zustandsbericht zur Erde gesendet werden sollte, wird verzichtet, weil die Bahnverfolgung beim SOI-Manöver mit der kleinen Antenne genügend genau möglich ist.

Während CASSINI also vom C-Ring über den B-Ring, die Cassinische Teilung, den A-Ring und schließlich den F-Ring hinwegrast, soll die Telekamera 45 Aufnahmen gewinnen; die Bildauflösung liegt zwischen 100 m und 250 m pro Pixel und erreicht somit fast den Bereich der größten Ringpartikel. Die Wissenschaftler um die ISS-Teamleaderin Carolyn Porco hoffen, in diesen Aufnahmen theoretisch vorhergesagte, kleinskalige wellenartige Strukturen zu finden, die durch kleine Inhomogenitäten der Materieverteilung im Ringsystem bedingt werden und analog (in anderem Maßstab) schon in Galaxien beobachtet wurden. Das »Ion and Neutral Mass Spectrometer« versucht, die Zusammensetzung der Umgebungspartikel zu messen, und auch alle anderen Instrumente sammeln so viele Daten, wie sie auf die Datenrecorder zu transportieren imstande sind.

Gegen 6:33 MESZ wird die Fernerkundung kurz ruhen; CASSINI/HUYGENS muss wieder mit der Antenne voraus fliegen, da zu diesem Zeitpunkt erneut die Ringebene durchflogen wird. Nach $3\frac{3}{4}$ Stunden über der nördlichen Saturnhemisphäre

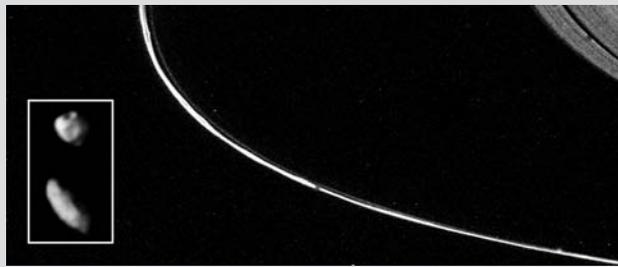
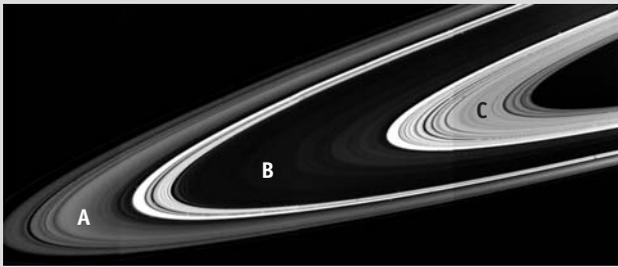


▲ Die Schiefermonde des F-Rings, Prometheus (oben) und Pandora (unten) am 1. Mai 2004. Rechts oben ist der Mond Epimetheus zu sehen. (Bild: NASA/JPL/SSI)

wechselt die Sonde zurück nach Süden, und die beleuchtete Seite der Ringe gerät für die nächsten Monate wieder ins Blickfeld. Unter einem sehr schrägen Winkel zwar, aber dennoch wird diese Geometrie sogleich ausgenutzt. 22 Minuten lang werden die Fernerkundungsinstrumente kleine Ausschnitte vom F-Ring und vom A-Ring, also den äußeren Ringbereichen, zu den Datenrecordern senden. Weniger als 1 km kleine Details sollen in den 36 geplanten Bildern sichtbar werden.

Um 7:36 MESZ – 4 Stunden und 24 Minuten nach Beginn des SOI-Manövers – wird die Hauptantenne von CASSINI er-

Die Ringe von Saturn im Blick von VOYAGER

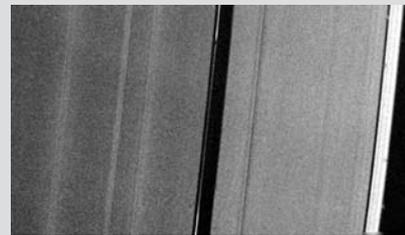


Während und nach dem Abbremsmanöver wird CASSINI die unbeleuchtete Seite der Ringe überfliegen, von denen hier ein Bild von VOYAGER-1 gezeigt ist (oben). Der weitgehend lichtundurchlässige B-Ring erscheint dunkel, während der weniger dicht mit Teilchen bepackte A-Ring, der staubreichere C-Ring und insbesondere die Cassinische Teilung im Durchlicht heller erscheinen. Die Encke-Teilung (außen) hingegen ist auch im Gegenlicht dunkel, hier räumt der darin umlaufende Mond Pan alle Partikel zur Seite. Nach der zweiten Durchquerung der Rin-

gebene wird CASSINI für einige Minuten die äußeren Ringpartien sehen können.

Die Aufnahme von VOYAGER-1 oben rechts zeigt den zwischen etwa 30 und 500 km dünnen, zum Teil merkwürdig verdreht geformten F-Ring, der außerhalb des Hauptrings liegt. Für seine schnurartige Form sind die beiden rund 100 km großen Monde Prometheus und Pandora verantwortlich (Inset).

Rechts ist der A-Ring von Saturn in einer Aufnahme von VOYAGER-2 zu sehen. Die breite Ringlücke ist die Enckesche Teilung. Die hellen Streifen direkt links



davon sind Gebiete mit einer erhöhten Ringteilchendichte. Die beiden äußeren Ring entstehen durch Umlaufbahn-Resonanzen mit den kleinen Monden Janus (linker Streifen) und Mimas. (Bilder: NASA/JPL)

neut zur Erde gedreht, so dass zehn Minuten später mit der Datenübertragung begonnen werden kann. Hierbei werden diese wertvollen Daten zweimal zur Erde gefunkt, zunächst zur Station in Madrid, wo die ersten Datenpakete ab etwa 9:10 MESZ eintreffen sollten, und später nach Goldstone in Kalifornien. Fast 20 Stunden lang wird CASSINI mit dem doppelten Entleeren seiner Datenspeicher beschäftigt sein. Gegen 14:39 MESZ erreichen die ersten Bilddaten aus dem Saturnsystem die Bodenstation, die möglicherweise nur wenige Stunden später schon teilweise veröffentlicht werden.

2. Juli 2004: »T0«, Titan-Vorbeiflug auf Distanz

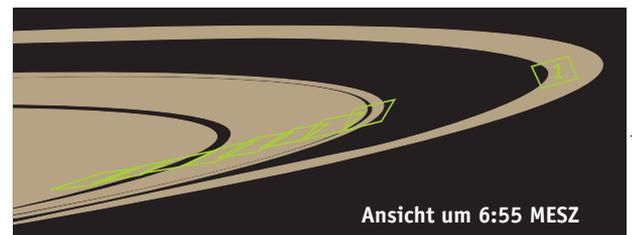
Viel Zeit zum Atemholen bleibt nicht. Bereits wieder fast eine Million km vom Ringplaneten entfernt, nähert sich die Sonde dem Mond Titan, der in 1,22 Millionen Kilometer Distanz zu Saturn seine 16 Tage dauernden Runden dreht. Um 11:31 Uhr MESZ unterquert CASSINI den Südpol Titans in etwa 339 000 km Distanz, und sechs Bilder der Telekamera werden nötig sein, um die sichtbare Titanhemisphäre komplett abzubilden. 2 km/Pixel ist die theoretisch mögliche Auflösung, insgesamt sind 188 Bilder für die ISS-Kameras geplant.

Wie stark das Licht durch die Aerosolschicht in wenigen hundert Kilometern Höhe gestreut wird, wieviel »Schärfe« diese Schwebteilchenschicht den Aufnahmen also nehmen wird, ist völlig unbe-

kannt. Die VOYAGER-Sonden konnten ja Titans Oberfläche so gut wie gar nicht sehen, aber bei größeren Wellenlängen nahe 1 Mikrometer – in einem Bereich also, in dem die Kameras von VOYAGER blind waren – ist es denkbar, dass die Aerosolteilchen zu klein sind, um das von der Oberfläche zurückgeworfene Licht noch effektiv stören zu können. Hoffen wir es!

Das Beobachtungsfenster der Titan-Planungsgruppe dauert genau von 3:06 MESZ am 2. Juli bis 16:06 MESZ am 3. Juli, anschließend beginnt die Datenübertragung. Kurz zuvor wird es noch eine erste Iapetus-Beobachtung aus der Saturn-Umlaufbahn geben; diese könnte erstmals eindeutig Oberflächenstrukturen auf der dunklen Hemisphäre dieses merkwürdigen, in 3,6 Mio. km Distanz um den Saturn kreisenden »zweifarbigen« Mondes zeigen (siehe Seite 40).

Nach dem Intermezzo mit Titan bleibt nur noch ein Tag, bevor CASSINI gemeinsam mit Saturn von der Erde aus gesehen für einige Tage hinter der Sonne verschwindet, da sich der Ringplanet dann in Konjunktion zur Sonne befindet. Dieser 4. Juli wird fast ausschließlich für Beobachtungen der Ringe genutzt. Zunächst soll nach der Ursache der »Speichen« geforscht werden, die schon im 19. Jahrhundert in den Ringen beobachtet wurden (SuW 11/1981, S. 405). Anschließend steht die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung der Ringteilchen im Vordergrund. Mit einer erneuten Beobachtung von Iapetus verabschiedet



Ansicht um 6:55 MESZ



Ansicht um 7:13 MESZ

▲ Eine Beobachtung der beleuchteten Seite von F- und A-Ring durch CASSINI erfolgt eine halbe Stunde nach der zweiten Durchquerung der Ringebene. Im oberen Bild ist die Perspektive zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme am 1. Juli um 6:55 MESZ gezeigt, im unteren für die letzte, 18 Minuten später. Die grünen Quadrate zeigen den Bildausschnitt der Telekamera. Für jeden Bildausschnitt sind je zwei Aufnahmen mit der Telekamera und mit der Weitwinkelkamera vorgesehen.

sich CASSINI für einige Tage »in den Urlaub«. Vom 5. bis zum 13. Juli werden nur die Felder- und Partikel-Instrumente Daten sammeln.

»Go-West-Plan« in Orbit »0«

Der erste Umlauf um Saturn ist noch sehr langgestreckt, und die Umlaufdauer liegt bei 119 Tagen. Der Phasenwinkel beträgt jetzt für viele Wochen etwa 90°, das heißt, Saturn und die Monde werden als von rechts beleuchtete »Halbmonde« gesehen. (Der Phasenwinkel ist der Winkel zwischen Sonne und Beobachter für einen bestimmten Punkt auf einer Oberfläche.) Ende August wird sich CASSINI/HUYGENS nochmals bis auf neun Millionen km von Saturn entfernen.

In dieser Zeit werden die Beobachtungen der Fernerkundungsinstrumente nach einem sich alle drei Tage wiederholenden Schema durchgeführt. Der Plan wurde nach dem Wissenschaftler Robert West, der ihn ausgearbeitet hat, »Go-West-Plan« benannt. Er beginnt mit Navigationsbildern, gefolgt von Iapetus-Aufnahmen. Anschließend folgen die Beobachtungen von atomarem Wasserstoff und Sauerstoff in der Saturn-Magnetos-

phäre durch das Ultraviolett-Spektrometer UVIS, die bereits beim Anflug ausgeführt wurden. Bei ihnen kommt es darauf an, über einen langen Zeitraum möglichst viele Photonen zu sammeln.

Auf diese Beobachtungen folgt ein neunstündiger »Downlink«, also das Herunterspielen der Daten zur Erde. Der anschließende »Tag 2« beginnt wieder mit optischer Navigation, gefolgt von Untersuchungen der Saturn-Aurora, also des Polarlichts auf dem Ringplaneten, dazwischen erneut die Untersuchung der Wasserstoffumgebung. Nach einem weiteren Downlink verläuft »Tag 3« ähnlich wie der vorhergehende, nur mit dem Unterschied, dass die Beobachtungszeiten anders verteilt sind. Dieses Schema wird nur von sporadischen technischen Aktivitäten wie beispielsweise dem Überprüfen der HUYGENS-Sonde am 14. Juli unterbrochen. Ab dem 12. August werden die Beobachtungen von Iapetus durch Untersuchungen der Ringe ersetzt, deren Ziel das Studium von diffusen Saturnringen wie dem äußeren E-Ring ist.

Am 23. August wird ein großes, etwa einstündiges Triebwerkmanöver durchgeführt, bei dem CASSINI um 1400 km/h be-

schleunigt wird. Diese als »Periapsis Raise Maneuver« bezeichnete Aktivität dient zur Anhebung des saturnnächsten Bahnpunktes und für den ersten Anflug auf Titan. Am 27. August erreicht CASSINI/HUYGENS seinen ersten Apoapsispunkt, bei dem die offizielle Zählung der Orbits von »0« nach »A« wechselt.

»Go-East-Plan« in Orbit »A«

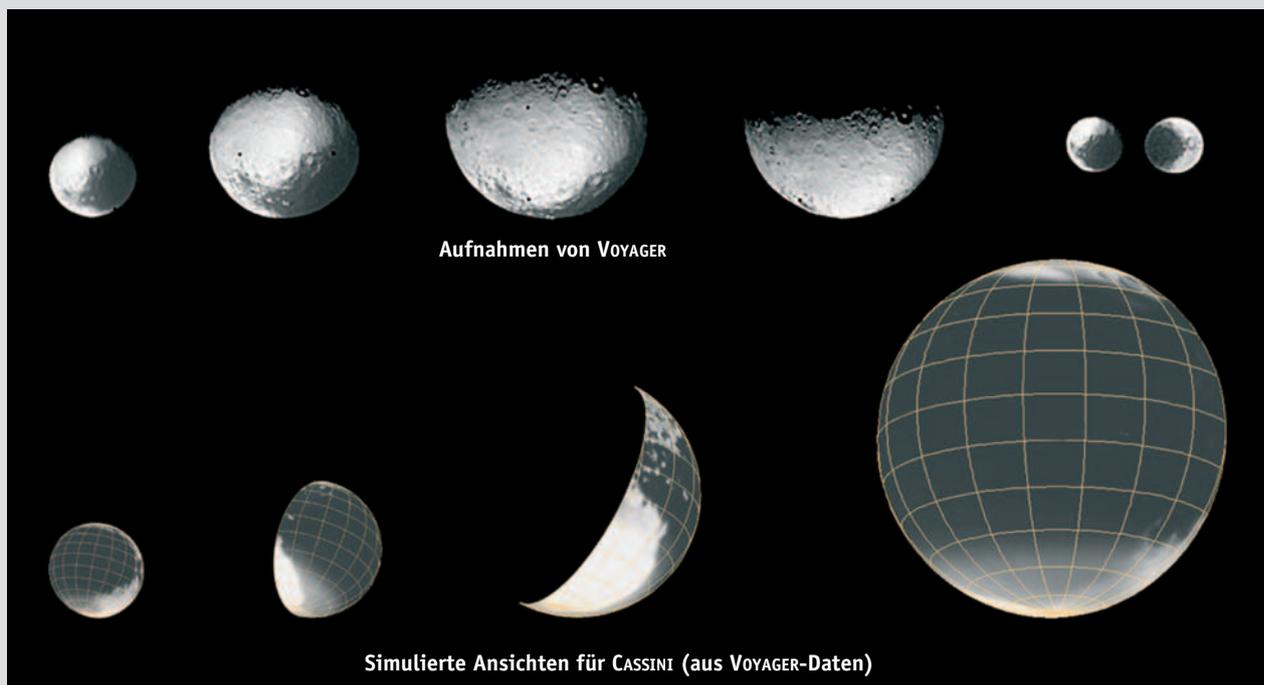
Der »Go-West-Plan« wird am 6. September durch den »Go-East-Plan« abgelöst, und CASSINI ist bereits wieder dabei, sich Saturn zu nähern. Der Phasenwinkel hat leicht auf 83° abgenommen und wird sich in den kommenden Wochen weiter verringern. Am ersten Tag werden wie zuvor Beobachtungen der diffusen Saturnringe und der Magnetosphäre durch das Ultraviolett-Spektrometer erfolgen. Am zweiten Tag werden als neue Beobachtung die Saturnatmosphäre und die Ringe über einen Zeitraum von über 20 Stunden aufgenommen, diese Beobachtungen dienen wieder der Langzeit-Wetterbeobachtung. Am dritten Tag schließlich wird die verfügbare Zeit zwischen den Saturn- und den Magnetosphären-Beobachtungen aufgeteilt. An allen Tagen wird es nach

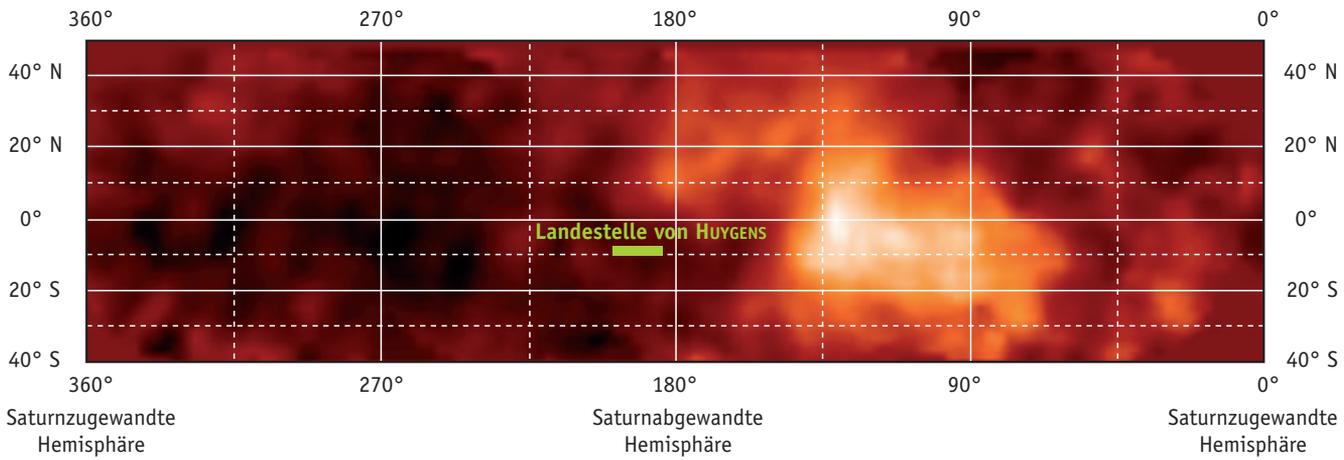
Iapetus – der Mond mit den zwei Gesichtern

Aufnahmen der beiden VOYAGER-Raumsonden von Iapetus, dem Mond mit den »zwei Gesichtern« (obere Reihe), im Vergleich mit Simulationen von geplanten CASSINI-Aufnahmen, die für die zweite Jahreshälfte 2004 erwartet werden (unten). Der Durchmesser von Iapetus beträgt etwa 1440 km, die besten Aufnahmen von VOYAGER-2 erreichen

eine Bildauflösung von nur 9 km/Pixel. Im Juli werden erstmals Details der dunklen Hemisphäre sichtbar (zwei Simulationsbilder unten links), für Oktober sind Bilder geplant, welche die bisherigen Daten deutlich übertreffen sollen (2. v. r. in der unteren Reihe). Vom 25. bis zum 27. Dezember sollen drei Bilder von Iapetus für die optische Navigation aufgenommen

werden, die alle bisherigen Daten an Schärfe übertreffen (rechts unten). Zum Jahreswechsel 2004/05 schließlich folgt ein Vorbeiflug an Iapetus in etwa 55 000 km Distanz. Hierbei würde der Durchmesser von Iapetus in den Bildern von CASSINI auf über 4400 Pixel anwachsen, was dem 14-fachen Durchmesser von Iapetus in den Navigationsbildern entspricht.





▲ Karte der Oberfläche des Mondes Titan aus Bildern des Weltraumteleskops HUBBLE aus dem Jahr 1994. Die Bildauflösung liegt bei 300 km, die Wellenlänge bei 0.9 µm. Der Durchmesser von Titan beträgt 5150 km. Das helle Gebiet hat etwa die Größe Australiens.

▶ Übersicht der Aktivitäten von CASSINI während des Zeitraums Mai 2004 bis Februar 2005.

wie vor Aufnahmen der Monde für die optische Navigation geben. Dieses Schema, das zweimal für HUYGENS-Aktivitäten unterbrochen wird, endet am 6. Oktober. CASSINI hat sich Saturn bereits wieder auf 6.4 Millionen Kilometer genähert, der Phasenwinkel ist auf 73° gesunken. Bereits am 12. September hat die Sequenz »S04« das Kommando übernommen. Am 14. September erfolgt der allerletzte HUYGENS-Checkout vor der tatsächlichen Mission.

Im Oktober 2004 wird es eine weitere Iapetus-Kampagne mit fast täglichen Aufnahmen geben, diesmal nähert sich CASSINI diesem Mond bis auf 1.1 Millionen Kilometer. Die Beobachtungen der Saturn-Atmosphäre und der Ringe werden weitergeführt, die Ultraviolett-Untersuchungen zurückgefahren. Neu sind ab 18. Oktober Infrarotspektrometer-Messungen der Zusammensetzung der Saturnatmosphäre, an diesem Tag übernimmt auch die Sequenz »S05« die Sondensteuerung. Ab dem 23. Oktober gehört die ganze Aufmerksamkeit dem kommenden gezielten Titan-Vorbeiflug.

26. Oktober 2004: Erster gezielter Titan-Vorbeiflug »Ta«

Der erste wirklich nahe Titan-Vorbeiflug wird CASSINI/HUYGENS bis auf 1200 km an den Mond heranbringen. Beim Anflug wird die geplante Landestelle von HUYGENS im Blickfeld sein. Die ersten Aufnahmen, die ab dem 23. Oktober aus 1.8 Millionen

Sequenz	Orbit	Segment	Beginn (MESZ/MEZ)	Dauer (Tage)	Bemerkungen
S01	0	Mag	14. Mai 2004, 20:40	27.4	Interplanetarer Anflug auf Saturn
S01	0	SOST	11. Juni 2004, 6:02	1.8	Phoebe 000PH
S01/S02	0	Mag	13. Juni 2004, 0:32	18.2	Anflug bis Abschluss S01
S02	0	SOI	1. Juli 2004, 5:06	0.9	Nach SOI (Ringe-Beobachtungen und Datenübertragung)
S02	0	TOST	2. Juli 2004, 3:06	2.0	Titan 000TI (ungezielt)
S02/S03	0	Mag	4. Juli 2004, 3:19	33.5	Konjunktion, »go-West«-Kampagne
S03/S04/S05	0/A	Atmo	6. Aug. 2004 15:37	80.1	Apoapsis rev 0/A, Bahnmanöver (Anheben der Periapsis)
S05	A	TOST	25. Okt. 2004, 18:31	1.7	Titan 00aTI
S05	A	Rings	27. Okt. 2004, 11:16	5.1	Periapsis in rev A, Tethys (ungezielt)
S05	A/B	Mag	1. Nov. 2004, 11:45	32.3	Apoapsis rev A/B
S05/S06	B	Atmo	3. Dez. 2004, 16:36	6.7	Rev B (Anflug auf Saturn)
S06	B	TOST	10. Dez. 2004, 7:06	4.1	Titan 00bTI
S06/S07	B	Atmo	14. Dez. 2004, 8:52	2.3	Periapsis in rev B, Dione (ungezielt)
S07	B	Mag	16. Dez. 2004, 13:22	14.5	HUYGENS ausrichten, abtrennen, CASSINI ablenken
S07	B/C	SOST	31. Dez. 2004, 2:30	2.1	Iapetus 00cIA (ungezielt)
S07	C	Mag	2. Jan. 2005, 5:38	13.3	Huygens-Mission, Titan 00cTI
S07	C	SOST	15. Jan. 2005, 13:00	2.9	Mimas, Enceladus, Rhea (alle ungezielt)
S07/S08	C/3	Mag	18. Jan. 2005, 11:00	17.0	Apoapsis rev C/3
S08	3	Atmo	4. Feb. 2005, 12:07	9.9	Rev 3 (Anflug auf Saturn)
S08	3	TOST	14. Feb. 2005, 10:07	2.0	Titan 003TI
S08	3	SOST	16. Feb. 2005, 10:00	2.0	Enceladus 003EN (ungezielt)

MESZ/MEZ = Mitteleuropäische (Sommer-)Zeit.

SOI = Saturn orbit insertion, Manöver zum Einschuss von Cassini in die Saturnumlaufbahn.

rev = revolution, Umlauf, Zählung wechselt im Apoapsispunkt (0, A, B, C, 3, 4, 5, ..., 74).

Segmente: Atmo = Atmosphäre (Saturn); Rings = Ringe; Mag = Magnetosphäre; SOST = Monde außer Titan; TOST = Titan.

km Distanz vorgesehen sind, werden eine Auflösung von 11 km/Pixel haben, und Titan passt noch bequem ins Bildfeld der beiden Kameras. Der Anflug erfolgt über der beleuchteten Titan-Seite unter einem Phasenwinkel von 23°, so dass Titan CASSINI fast als »Vollmond« erscheint. Auch das RADAR-Instrument wird den Mond für wenige Stunden aus größerer Distanz beobachten. Im Blickfeld liegt die dem Saturn abgewandte Hemisphäre.

Am 25. Oktober etwa ab 19:00 MESZ beginnt der Endanflug. Zunächst wech-

seln sich die Kamera und die beiden Infrarotspektrometer CIRS und VIMS als »Prime-Instrumente« ab. Etwa zwei Stunden vor der größten Annäherung endet diese Phase. Die Titandistanz beträgt nur noch 36 000 km, hier liegt die beste Bildauflösung theoretisch bei 216 Meter. CASSINI wechselt jetzt den Modus der Lageregelung: Von der Lagekontrolle durch die Schwungräder schaltet die Sonde um in die Kontrolle durch kleine Raketendüsen. Wegen der Hochatmosphäre von Titan und des dadurch möglichen, sehr leicht-

ten Reibungswiderstands, der die Sonde ins Taumeln bringen könnte, ist es bislang nicht erlaubt, dass CASSINI unter der Kontrolle der Schwungräder solche Vorbeiflüge wagt.

Da mit den Düsen die Lagekontrolle aber nicht ganz so präzise ist wie mit den Schwungrädern – hier pendelt die Sonde immer ein klein wenig um die Ruhelage herum – ist es jetzt kaum möglich, die Oberfläche des Titan mit der Telekamera aufzunehmen. Noch ist unklar, in welchen Farbfiltern sie am besten sichtbar ist. Es ist aber recht wahrscheinlich, dass dies in einem eher schmalbandigen Filter im nahen Infrarot, eventuell in Kombination mit einem Polarisationsfilter, der Fall sein wird. Da diese Filterkombination jedoch nur wenig Licht durchlässt, muss jede Aufnahme voraussichtlich mehrere Sekunden lang belichtet werden. Ein »Pendeln« der Sonde würde diese Bilder verschmieren, dazu kommt, dass die rasante Annäherung ebenfalls eine Bildverschmierung erzeugen würde. Während der Belichtung würde Titan gewissermaßen »zu schnell wachsen«.

Aus diesem Grund wurde die Zeit um die größte Annäherung dem RADAR-Instrument übergeben. Bei »Ta-79 min.«, also 79 Minuten vor der größten Annäherung an Titan beim Vorbeiflug »Ta«, übernimmt es die Steuerung

der Sondenausrichtung. 45 bis 20 Minuten vor dem Vorbeiflug sind noch einmal die Fernerkundungsinstrumente an der Reihe. Für das Infrarotspektrometer VIMS beispielsweise gehören diese Beobachtungsminuten zu den wichtigsten während der gesamten Mission, da die Beobachtungsgeometrie mit nur 20° Phasenwinkel äußerst günstig ist. Die Bildauflösung könnte in 352 Spektralkanälen bis zu 1 km/Pixel erreichen! Damit wären diese auch für geologische Studien geeigneten Daten mit den Bildern der VOYAGER-Sonden der Galileischen Monde des Jupiter vergleichbar.

Von Ta-20 min. bis Ta+5 Stunden ist dann wieder RADAR das Prime-Instrument. CASSINI/HUYGENS erreicht am 26. Oktober 2004 kurz vor 17:30 MESZ den titannächsten Punkt dieses Vorbeifluges in einer Distanz von 1200 km zur Oberfläche und wechselt auf die unbeleuchtete Seite über. Für das RADAR-Experiment, das seine Wellen ja selbst aussendet, spielt das aber keine Rolle. Während der größten Annäherung wird die »Bugseite« von Titan im Blickfeld sein, also die Hemisphäre, die beim Umlauf des Titan um den Saturn immer in Flugrichtung weist. Anschließend, wenn sich CASSINI wieder entfernt, kann die dem Saturn zugewandte Hemisphäre des Titan studiert werden. Kleine, streifenförmige Ausschnitte der Oberfläche, ähnlich wie sie von der Mission MAGELLAN zur Venus bekannt sind, sollen mit einer Auflösung zwischen $\frac{1}{2}$ und $1\frac{1}{2}$ Kilometern die Titan-Oberfläche zeigen. Anders als die Fernerkundungsinstrumente, bei denen nicht klar ist, wie gut sie die Oberfläche sehen können, werden wir spätestens zu diesem Zeitpunkt gute und detaillierte Informationen über die Oberfläche des Titan erhalten.

Ein weiterer sehr wichtiger Forschungsgegenstand wird die Bestimmung der Zusammensetzung der Hochatmosphäre, insbesondere des Methangehal-

tes, sein. Mit dem »Ion and Neutral Mass Spectrometer«, einem Instrument zur Untersuchung von geladenen und neutralen Molekülen, werden diese Messungen direkt möglich sein. Sie sind wichtig, um die Atmosphärenmodelle, die für die Landung von HUYGENS verwendet werden, zu verfeinern und bessere Vorhersagen über den Flugverlauf der Landesonde machen zu können. Dazu sollen zusätzlich die Windverhältnisse an der Landestelle bestimmt werden, damit CASSINI im Januar die Position von HUYGENS besser verfolgen und seine Signale genauer empfangen kann.

Am 27. Oktober, etwa zwei Stunden nach Mitternacht, beginnt die Datenübertragung. CASSINI/HUYGENS hat die Äquatorebene des Saturn durchquert und hat jetzt wieder – diesmal für zwei Tage – die unbeleuchtete Seite der Ringe im Blick.

Rückkehr in Saturnnähe

So sind auch die folgenden vier Tage fast ausschließlich der Beobachtung der Ringe gewidmet, insbesondere der Beobachtung der staubreichen Regionen und der weniger dichten Ringe wie des inneren C-Rings. Am Abend des 28. Oktober durchfliegt CASSINI den E-Ring, einen weit außen liegenden, diffusen Teilchentorus, der möglicherweise vom Mond Enceladus erzeugt wird. Für zwei Stunden wird der in Heidelberg gebaute Staubdetektor (CDA, Cosmic Dust Analyzer) das Prime-Instrument sein.

Für den Morgen des 28. Oktober sind auch die ersten hochauflösenden Aufnahmen des mittelgroßen Monds Tethys geplant. Tethys besitzt ein großes Grabensystem, das diesen Mond möglicherweise komplett umspannt. Die Beobachtungsdistanz beträgt etwa $\frac{1}{4}$ Million km, und die »Heckseite« von Tethys, also der Teil, der entgegen der Flugrichtung weist, ist beobachtbar. In diesem Bereich befindet sich weit im Norden auch ein großer Teil des Ithaca Chasma genannten großen Grabens. Die Bildauflösung beträgt 1.5 km/Pixel; somit wird die Bildqualität bereits über derjenigen des besten Bildes von VOYAGER-2 vom August 1981 liegen.

Nur wenige Stunden später wird der Periapsispunkt von Orbit »A« durchflogen. CASSINI/HUYGENS kommt diesmal nur auf 312 000 km an Saturn heran, der aber erst zwei Tage später wieder beobachtet wird.

Orbits »A« und »B«

Der gezielte Vorbeiflug an Titan hat die Umlaufdauer zwischen den Periapsis-Durchflügen von Orbit »A« und »B« auf 48 Tage verkürzt. Die Beobachtungen zur Bahnvermessung der Monde und von atomarem Wasserstoff in der Magnetosphäre

▼ Aufnahmen von VOYAGER-2 des Eismondes Tethys. Links das bisher beste Bild (Bildauflösung etwa 2.5 km/Pixel). Die rechte Aufnahme zeigt die »Heckseite« von Tethys; diese Region soll von CASSINI am 28. Oktober fotografiert werden. Ithaca Chasma, ein Grabensystem, das Tethys möglicherweise komplett umspannt, ist in beiden Aufnahmen zu sehen. Der Durchmesser von Tethys beträgt 1060 km.



re des Saturn werden bis zum 13. November und nochmals ab dem 24. November den Beobachtungsplan dominieren. Am 6. November soll es zudem eine Beobachtung des Titan mit RADAR aus großer Entfernung geben. Auch sind Infrarot-Messungen zur Zusammensetzung der Ringe in den nachfolgenden Tagen vorgesehen. Ab dem 15. November, gleich zu Beginn der Sequenz »S06«, sollen die rätselhaften Speichen in den Saturnringen über einen Zeitraum von neun Tagen untersucht werden. Mit Hilfe von Kamera-Aufnahmen wird aus den Daten eine kleine Filmsequenz erstellt, mit der dieses Phänomen im Detail studiert werden kann. Am 21. November erreicht CASSINI/HUYGENS zum zweiten Mal den saturnfernsten Bahnpunkt, diesmal nur noch 4,7 Millionen Kilometer vom Ringplaneten entfernt. Hier beginnt auch Umlauf »B«.

Am 30. November findet ein wichtiges Ereignis für HUYGENS statt – auf der Erde allerdings: An diesem Tag fällt die »Go/no-go«-Entscheidung darüber, ob die Sonde im Januar 2005 auf Titan landen soll.

Nachdem der Periapsisdurchflug von Umlauf »A« vor allem Beobachtungen der Ringe vorbehalten war, ist die Annäherung in Orbit »B« im Wesentlichen der Beobachtung von Saturns Atmosphäre gewidmet. Ab dem 2. Dezember steht Saturn auf dem Beobachtungsplan, und mit Bildauflösungen besser als 20 km/Pixel können erstmals Wolkenstrukturen und ihre Bewegungen in einer Detailgenauigkeit untersucht werden, wie es im Jupitersystem mit der Raumsonde GALILEO möglich war. Am 10. Dezember beginnt die viertägige Beobachtungsphase für den zweiten gezielten Vorbeiflug am Titan.

13. Dezember 2004: Zweiter gezielter Titan-Vorbeiflug »Tb«

Die Anflug- und Abfluggeometrie ist fast identisch mit jener der ersten Titan-Passage. Wieder nähert sich CASSINI dem Riesenmond über der beleuchteten, saturnabgewandten Seite, und wieder ist die Landestelle von HUYGENS im Blickfeld. Die Vorbeiflughöhe liegt diesmal mit 2200 km aber ein wenig höher, so dass kein Umschalten des Lagekontrollsystems von den Schwungrädern auf die Düsen erforderlich ist. Dieser Vorbeiflug ist daher für die Fernerkundungsinstrumente ideal, es sind Beobachtungen der Oberfläche bis zwei Minuten nach der größten Annäherung geplant. Theoretisch liegt die Bildauflösung der Telekamera bei etwa 15 Metern. Einige Wissenschaftler sind optimistisch, dass dies trotz möglicher Bildverschmierung durch die Bewegung der Sonde und Lichtstreuung durch die Atmosphäre Titans auch praktisch erreicht

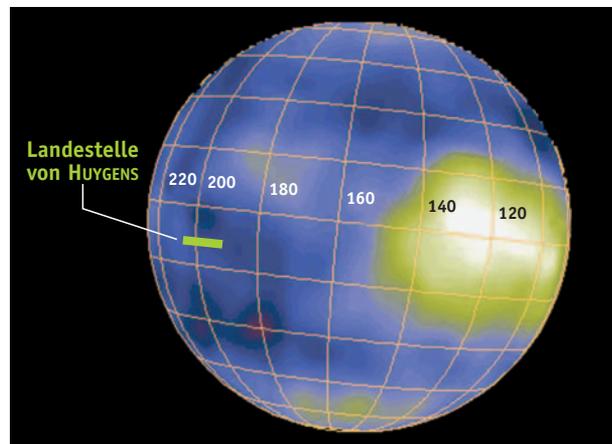
werden könnte. Mit 150 m/Pixel wird auch die Weitwinkelkamera in einen Auflösungsbereich vorstoßen, der bis dahin unerreicht ist. Ein solches Bild der Weitwinkelkamera kann etwa 0,2 Promille der Titanoberfläche erfassen. Insgesamt sind neben den Messungen der drei Spektrometer VIMS, CIRS und UVIS mehrere Hundert Bilder vorgesehen, die Detailplanung steht noch aus. Die größte Annäherung soll am 13. Dezember gegen 12:30 Uhr Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) über der nördlichen Bugseite Titans erfolgen.

Zwischen Tb+2 min. und Tb+50 min. beobachtet das Ultraviolett-Spektrometer UVIS zwei Sternbedeckungen durch Titan. Solche Untersuchungen geben einen genauen Aufschluss über chemische und physikalische Eigenschaften der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe. Anschließend folgen für einige Stunden spektrale Untersuchungen der unbeleuchteten Seite und der Titan-Sichel, und kurz vor Mitternacht beginnt schließlich die Datenübertragung.

Zweite Rückkehr in Saturnnähe

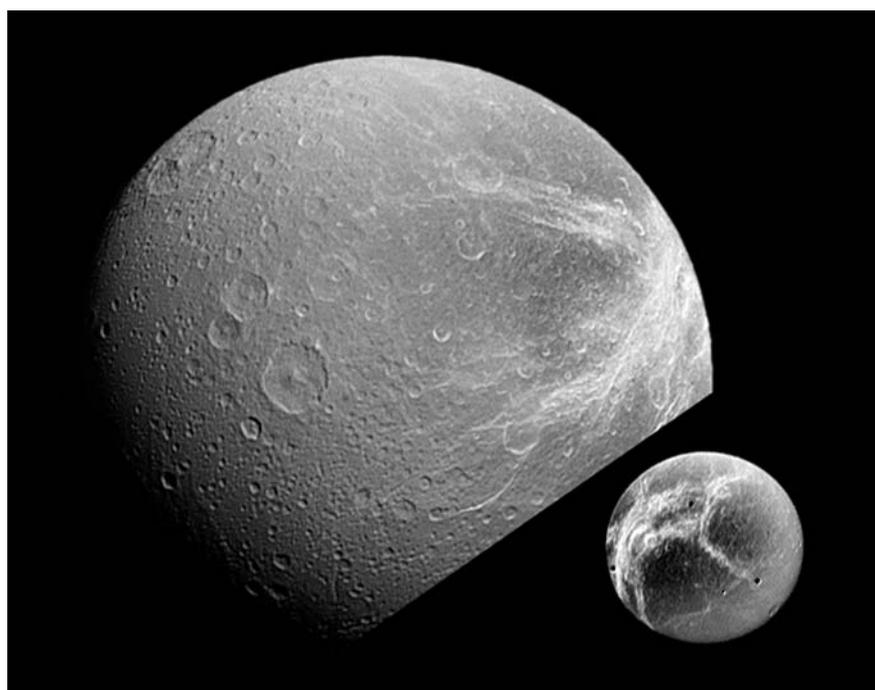
Die zweite Rückkehr in Saturnnähe, bei der sich CASSINI dem Riesenplaneten bis auf 230 000 km nähert, enthält Beobachtungen aller Disziplinen. Am 14. Dezember wird Saturn zunächst für zehn Stunden beobachtet, hier ist das Infrarotspektrometer VIMS das Prime-Instrument, und die chemische Zusammensetzung steht im Vordergrund. In der Nacht vom 14. zum 15. Dezember folgen Beobachtungen der Ringe und der Atmosphäre durch das CIRS-Spektrometer.

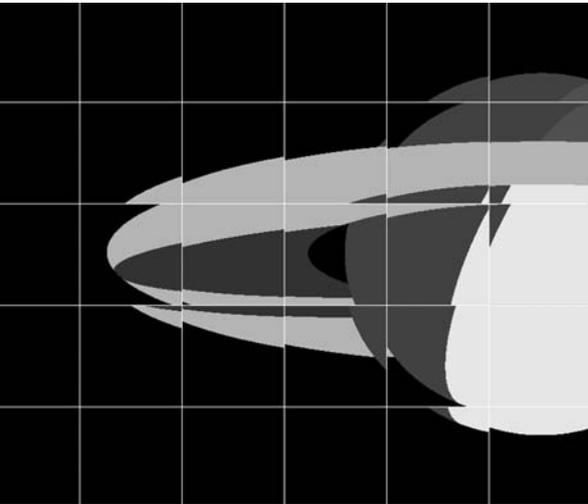
Unmittelbar davor und danach stehen die ersten hochauflösenden Beobachtungen des Mondes Dione auf dem Plan. Die



- ▲ Simulation der Sicht von CASSINI auf die saturnabgewandte Seite von Titan (Durchmesser: 5150 km) beim Anflug am 13. Dezember, etwa eine Stunde vor der größten Annäherung aus 20 000 km Distanz. Der Eintrittspunkt von HUYGENS in die Atmosphäre liegt in der Mitte des eingezeichneten Balkens, je nach Windrichtung treibt die Sonde dann nach rechts (wahrscheinlich) oder links (weniger wahrscheinlich) ab.

- ▼ Aufnahmen des Mondes Dione von VOYAGER-1. Die Heckseite dieses Mondes (kleines Bild) wird von einem hellen Streifenmuster dominiert. Das große Bild zeigt die beste Aufnahme, auf der noch Teile dieser als »whispy streaks« bezeichneten Oberflächenstrukturen zu sehen sind. Der Durchmesser von Dione beträgt 1120 km.





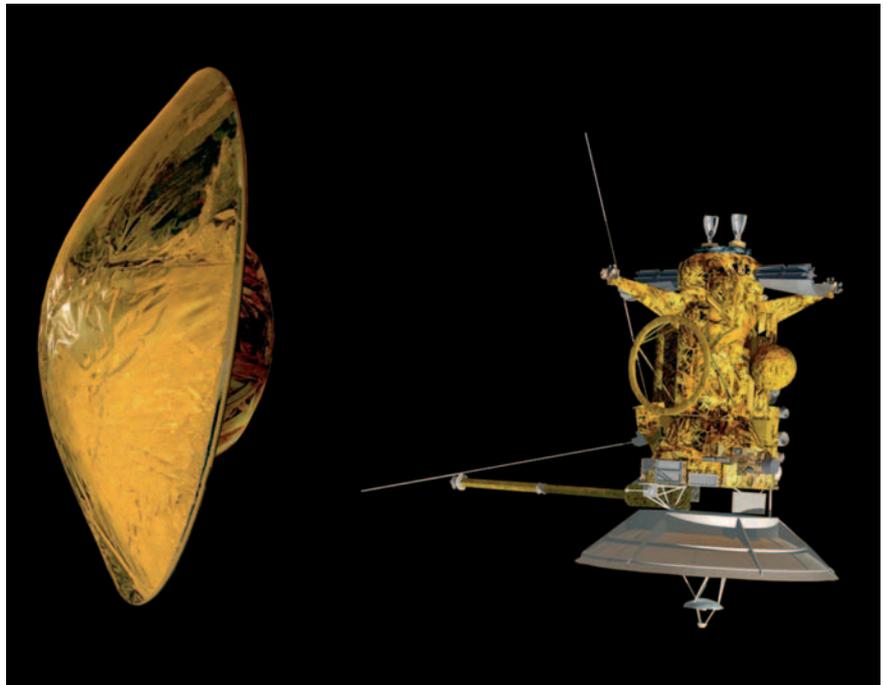
▲ Am 6. Oktober sollen in einem Zeitraum von drei Stunden aus 6.4 Mio. km Distanz Saturn und seine acht größten Monde aufgenommen werden. Die Grafik zeigt die geplanten Bildausschnitte für das erste von zwei »5×6-Mosaiken« der Telekamera. Bei einer Bildauflösung von 38 km/Pixel überspannen die Ringe einen Bereich von 7200 Bildpunkten!

Sonde kommt Dione bis auf 81000 km nahe, und dieser ungezielte Vorbeiflug ist die drittbeste Beobachtungsmöglichkeit der gesamten Mission. Das sichtbare Gebiet liegt auf der Heckseite. Dabei wird das Areal mit den merkwürdigen hellen Streifen gut sichtbar sein, das in den Bildern von VOYAGER als ein besonderes Charakteristikum dieses Mondes erkannt wurde und noch einer Erklärung harret. Mit etwa 500 m/Pixel werden die besten VOYAGER-1-Aufnahmen um mehr als das Doppelte übertroffen. Auch eine zweistündige RADAR-Beobachtung von Dione ist vorgesehen.

Nach Dione folgen ab 7:30 MEZ Magnetfeldmessungen in Saturnnähe und die obligatorischen Navigationsbilder einiger Monde, gefolgt von einer kurzen, nur sechsstündigen Datenübertragung. Am selben Tag wird es dann noch zwei Beobachtungen der Ringe geben. Der anschließende Downlink beginnt am 16. Dezember um 1:00 MEZ und markiert sowohl den Beginn der Sequenz »S07« als auch der »heißen Phase« für die HUYGENS-Mission.

HUYGENS wird flügge

Um die Mission HUYGENS vor möglichen Fehlfunktionen der Sonde CASSINI zu schützen, wird es ab dem 16. Dezember 2004 für einen Monat fast keine Fernerkundung von CASSINI geben, sondern die Sonde wird täglich für etwa 18 Stunden in Kontakt mit den Bodenstationen in Ma-



▲ In der Nähe Saturns am 25. Dezember 2004 gegen 3:00 MEZ: HUYGENS wird vom CASSINI-Mutterschiff abgetrennt und begibt sich auf seine letzte Reise.

drid oder Goldstone stehen. Einzige Ausnahmen sind Bilder für die optische Navigation (bis 27. Dezember), Aufnahmen für Kalibrationszwecke, die keine besondere Ausrichtung der Sonde benötigen (bis 28. Dezember), sowie wahrscheinlich Beobachtungen des Mondes Iapetus an Silvester und Neujahr. Bereits für die Nacht vom 16. zum 17. Dezember ist das »PTM«, das »Probe Targeting Maneuver« geplant, bei dem die Flugbahn von CASSINI/HUYGENS so geändert wird, dass sie genau auf die geplante Landestelle von HUYGENS zielt. Eine möglicherweise notwendige kleine Bahnkorrektur kann am 22. Dezember erfolgen. Am 25. Dezember gegen 3:00 Uhr MEZ wird HUYGENS dann abgetrennt. Mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 km/h entfernt sich HUYGENS von der Muttersonde. 2628 Tage sind seit dem Start vergangen, und seit 2714 Tagen bzw. fast genau $7\frac{1}{2}$ Jahren waren die beiden Raumsonden (bis auf eine fünftägige Reparatur im September 1997) ununterbrochen miteinander verbunden.

Die letzte Reise der HUYGENS-Sonde – jetzt alleine – wird dann nur noch etwas länger als 20 Tage dauern. Den größten Teil davon wird sie passiv, mit sechs Umdrehungen pro Minute rotierend, ohne jeglichen Funkkontakt auf einer ballistischen Flugbahn zum Titan verschlafen.

Elf Stunden nach der Abtrennung wird CASSINI versuchen, HUYGENS zu photographieren. Hierfür werden 25 Aufnahmen der Weitwinkelkamera in einem

»5 × 5-Mosaik« angeordnet. Einen Tag später und nochmals am 27. Dezember soll HUYGENS mit der Telekamera erfasst werden. Die Eintauchsonde sollte in den Bildern als kleines Scheibchen mit einem Durchmesser von zunächst vier, dann zwölf und schließlich noch etwa sieben Pixel erscheinen.

Noch sind beide Sonden auf Kollisionskurs mit Titan. So erwünscht dies für HUYGENS ist, die Bahn von CASSINI muss erneut korrigiert werden. Diese »Orbiter Deflection Maneuver« oder »ODM« genannte Bahnkorrektur ist für die Nacht vom 27. zum 28. Dezember eingeplant, mit einem Ersatztermin für den Notfall einen Tag später. In der Silvesternacht nähert sich CASSINI dem Mond Iapetus auf etwa 55000 km an. Hier besteht die Möglichkeit, diesen Saturnmond 20 Mal so scharf unter die Lupe zu nehmen wie je zuvor. □

Der nächste Teil dieser Artikelserie soll in der Dezember-Ausgabe von SuW erscheinen und die Landung von HUYGENS auf dem Titan beschreiben.



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.