

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

• Dione

• Tethys



Mimas

HUYGENS landet auf Titan

Die Erforschung der Saturnmonde beginnt

VON TILMANN DENK

Am 1. Juli 2004 schwenkte das Sondenpaar CASSINI/HUYGENS erfolgreich in eine Saturnumlaufbahn ein. Seitdem haben die beiden Sonden den Saturn bereits zwei Mal gemeinsam umrundet. Am 25. Dezember werden sie sich nach 2714 Tagen gemeinsamer Reise voneinander verabschieden müssen. Seine letzte Halbrunde um Saturn soll HUYGENS dann alleine absolvieren, antriebs- und steuerlos rotierend, mit direktem Kollisionskurs auf Titan, dem einzigen Mond im Sonnensystem mit einer dichten Atmosphäre.

Iapetus in der Silvesternacht

Vor dem großen Showdown bei Titan wird CASSINI aber noch eine andere wichtige Aufgabe zu erledigen haben: Die erste Beobachtung des zweigesichtigen Mondes Iapetus aus vergleichsweise geringer Distanz. Am Silvesterabend wird CASSINI in 117 500 Kilometern Abstand seine Oberfläche überfliegen und der Kamera

und den anderen Fernerkundungs-Instrumenten einen fast zehn Mal schärferen Blick erlauben, als dies bislang möglich war.

Erstmals wird das RADAR-Instrument Iapetus beobachten, und zwar sowohl die dunkle Hemisphäre beim Anflug als auch die helle beim Abflug. Die Beobachtungszeit wurde auf den ganzen Silvestertag

und den Neujahrstag gelegt, unterbrochen von zwei Perioden für die Datenübertragung zur Erde. Die schärfsten Bilder sollen eine Auflösung von etwa 710 Metern pro Bildpunkt erreichen. Zu sehen wird die nördliche Hemisphäre sein, und dort zum großen Teil Regionen, die bereits von VOYAGER 1 und 2 fotografiert wurden.

Dieser Vorbeiflug ist in vielerlei Hinsicht ungewöhnlich. Beispielsweise ändert sich die Distanz zwischen Iapetus und CASSINI über Stunden hinweg nur wenig. Das liegt daran, dass CASSINI sich am saturnfernsten Punkt der Bahn aufhält (der »Apoapsis«), wo die Sonde gemäß dem zweiten Keplerschen Gesetz recht langsam ist. Tatsächlich ist es auch Iapetus, der CASSINI »überholt« und nicht umgekehrt. Ungewöhnlich ist auch, dass mit zwei Gigabit nur die Hälfte des üb-

Enceladus



lichen Datenspeicherplatzes zur Verfügung steht. Dies liegt daran, dass die Teile des Rekorders, welche später die Daten von HUYGENS aufnehmen sollen, bereits gesperrt sind.

Für unsere Arbeitsgruppe an der Freien Universität und am DLR in Berlin kommt noch als Besonderheit hinzu, dass wir bei der wissenschaftlichen Planung federführend waren. Dies betrifft sowohl die gesamte Detailplanung der Kamerabeobachtungen und zum Großteil der VIMS-Spektrometerbeobachtungen als auch den Gesamtentwurf des Beobachtungszeitplans. Und schließlich hat der Vorbeiflug auch eine äußerst ungewöhnliche Vorgeschichte. Einzelheiten dazu sind im Kasten auf S. 28 ff beschrieben.

Am frühen Morgen des 2. Januar 2005 erfolgt ein dritter Kontakt mit der Erde, um die letzten Iapetus-Daten zu übertragen. Ab 5:38 MEZ werden dann die Aktivitäten von CASSINI sehr stark reduziert. Lediglich die Option für ein Korrekturmanöver des »Orbiter Deflection Manuevers«, das am 28. Dezember stattfinden sollte, wird für den 3. und 4. Januar noch offen gehalten. Am 6. Januar (genau um

12:53 MEZ) beginnt dann die »Probe Critical Sequence«. Alle wissenschaftlichen Instrumente wurden kurz zuvor ausgeschaltet, die Antenne weist zur Erde. Wie schon vor dem Einschuss in die Saturn-Umlaufbahn am 1. Juli 2004 wird jetzt jegliche unnötige Aktivität vermieden.

Die HUYGENS-Mission

Freitag, der 14. Januar 2005, 10:06 MEZ
Raumsondenzeit: Das soll die Minute sein, in der HUYGENS in steilem Winkel auf die Titanatmosphäre prallt. Wenige

Datum	Orbit	Mond	Durchmesser [km]	Beste Bildauflösung	Beste VOYAGER-aufnahme
16. 1. 2005	C	Mimas	400	940 m/pxl	1.1 km/pxl
17. 2. 2005	3	Enceladus	500	70 m/pxl	1.0 km/pxl
28. 10. 2004	A	Tethys	1050	1.5 km/pxl	2.6 km/pxl
15. 12. 2004	B	Dione	1120	440 m/pxl	1.4 km/pxl
16. 1. 2005	C	Rhea	1528	860 m/pxl	0.7 km/pxl
13. 12. 2004	B	Titan	5150	80 m/pxl	0.6 km/pxl
25. 2. 2005	3	Hyperion	220 × 370	7.8 km/pxl	4.4 km/pxl
31. 12. 2004	C	Iapetus	1500	710 m/pxl	8.6 km/pxl
11. 6. 2004	0	Phoebe	214	13 m/pxl	19 km/pxl

Das dieser SuW-Ausgabe beigelegte Poster von Saturn wurde aus 144 Einzelbildern der ISS-Teleskopkamera zusammengesetzt, wobei jedem einzelnen Farbbild je eine Schwarzweiß-Aufnahme im Rot-, Grün- und Blaufilter zugrunde liegt. Die Bildauflösung für Saturn beträgt 38 km pro Pixel, der Phasenwinkel 72°. Die Aufnahmen erfolgten am 6. Oktober 2004 zwischen 14.30 und 17.30 Uhr MESZ. Ein Teil der Planung für diese Sequenz wurde bereits in SuW 7/2004 auf Seite 44 gezeigt.

Minuten zuvor haben drei voneinander unabhängige »Wecker« HUYGENS aus ihrem »Winterschlaf« geweckt. Die Hauptantenne der noch etwa 71000 Kilometer entfernten CASSINI-Sonde ist exakt auf HUYGENS gerichtet, bereit, nach Radiosignalen aus der Titanatmosphäre vom ersten künstlichen Boten, der jemals zu diesem Himmelskörper geschickt wurde, zu lauschen. CASSINI steht jetzt ganz im Dienst der europäischen Eintauchsonde, und es ist für diesen Tag tatsächlich kein einziges Bild oder Spektrum und auch keine Magnetfeldmessung durch die Orbiter-Instrumente geplant. Auf der Erde wissen wir, wie alles genau ablaufen soll, erhalten aber keinerlei Kunde von den beteiligten Sonden, die in diesen Stunden ganz mit sich selbst beschäftigt sind. HUYGENS wird zunächst durch die starke Reibung der oberen Atmosphärenschichten stark abgebremst, geschützt durch den Hitzeschild.

Einmal bereits gab es im äußeren Sonnensystem eine Mission einer Atmosphärensonde. Im Dezember 1995 trat die Eintauchsonde der Raumsonde GALLI-

Beste Beobachtungen der Saturnmonde durch die ISS-Kamera der Raumsonde CASSINI bis Februar 2005 im Vergleich zu den VOYAGER-Missionen.



▲ HUYGENS kurz vor dem endgültigen Zusammenbau. Im Zentrum des sechseckigen Rahmens ist der eigentliche Sondenkörper zu sehen (Bild: ESA).

▶ Landung der Sonde HUYGENS auf Titan am 14. Januar 2005. Auf Titan dürfte immerzu rötliches Zwielicht herrschen, da die Atmosphäre das Sonnenlicht filtert. Ob HUYGENS auf hartem Eis oder in einem Methansee landen wird, wie hier gemalt, bleibt abzuwarten. (Bild: Mark Robertson-Tessi und Ralph Lorenz)

▼ Der komplexe Landevorgang von HUYGENS auf Titan. Einzelheiten siehe Text.

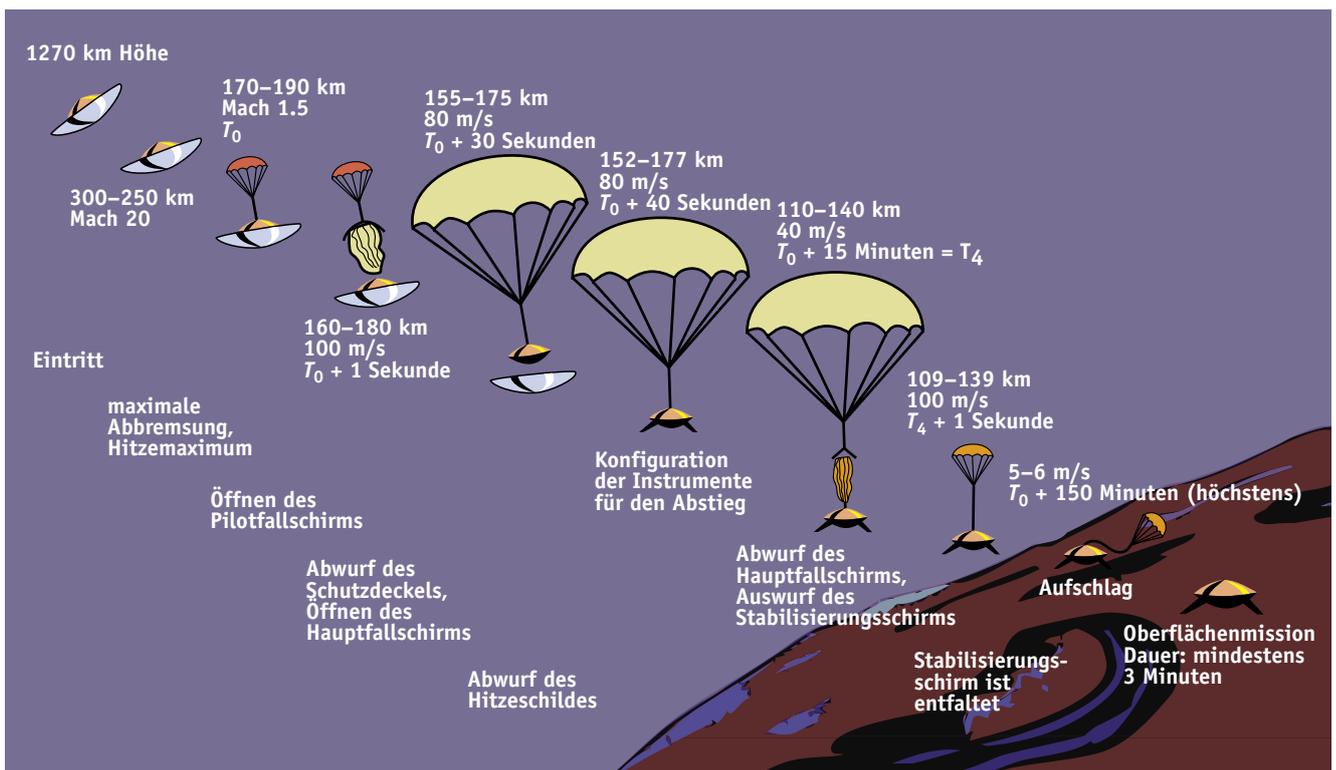


LEO mit 170 000 Kilometern pro Stunde in die obere Gashölle des Riesenplaneten Jupiter ein und wurde dort in nur zwei Minuten auf Autobahngeschwindigkeit abgebremst. Ihre erfolgreich absolvierte Aufgabe bestand darin, vor Ort grundlegende physikalische, chemische, meteorologische und andere Atmosphäreigenschaften zu messen.

Im Vergleich zu diesem Feuerritt hat es HUYGENS eher bequem: Etwa 20 000 Kilometer pro Stunde wird die Geschwindigkeit beim Eintritt in die Atmosphäre betragen, und bei einer maximalen Verzögerung von berechneten 160 m/s^2 müssen die Bordsysteme kurzzeitig nur etwa das 16-fache der Erdbeschleunigung aushalten. In etwa 400 Kilometer Höhe wird mit 1100 Grad Celsius die maximale thermische Belastung des Hitzeschildes erreicht. HUYGENS leuchtet dann wegen der ionisierten Kohlenstoff- und Stickstoffatome, die von der Titanatmosphäre stammen, violett.

Kurze Zeit später in etwa 250 Kilometer Höhe wird dann die maximale Bremsbelastung erreicht. Eine Minute danach liegt die Sinkgeschwindigkeit bei 1300 Kilometern pro Stunde, was immerhin noch dem 1,5-fachen der Schallgeschwindigkeit in der Titanatmosphäre entspricht. Jetzt öffnet sich der erste Fallschirm, die Höhe über dem Grund beträgt 170 Kilometer. Seine Aufgabe ist es, den »Deckel« von HUYGENS wegzuziehen.

Tatsächlich besteht HUYGENS nämlich aus drei Komponenten: Dem Hitzeschutzschild, dem oberen Schutzdeckel,



und der eigentlichen Sonde, welche die Messungen vornehmen soll. Nachdem also der Deckel abgeworfen ist, wird ein 8,6 Meter durchmessender Fallschirm geöffnet; dieser bremst die eigentliche HUYGENS-Sonde abrupt auf etwa 180 Kilometer pro Stunde ab. Kurz darauf wird der Hitzeschild abgeworfen.

Jetzt können die wissenschaftlichen Instrumente in vollem Umfang ihre Tätigkeit aufnehmen, derer sechs befinden sich an Bord. Ein Gas-Chromatograph und Massenspektrometer (GCMS) soll die Bestandteile der Titanatmosphäre sowie ihre Häufigkeit bestimmen. Im Falle einer erfolgreichen Landung kann vielleicht auch das Material der Oberfläche analysiert werden. Der »Aerosol Collector and Pyrolyser« (ACP) sammelt in verschiedenen Flugphasen Material aus der Aerosolschicht in der Titanatmosphäre, erhitzt die Proben und führt sie dem GCMS zu.

Das HUYGENS-Atmosphärenstruktur-Instrument (HASI) besitzt mehrere Sensoren und bestimmt physikalische Eigenschaften der Atmosphäre wie Temperatur, Druck, elektrische Leitfähigkeit usw. Auch ein Beschleunigungsmesser gehört zu diesem Experiment. Das Doppler-Wind-Experiment (DWE) registriert kleinste Frequenzverschiebungen des Signals zwischen HUYGENS und CASSINI. Daraus lassen sich wichtige Rückschlüsse auf die Windeinwirkungen auf HUYGENS ziehen.

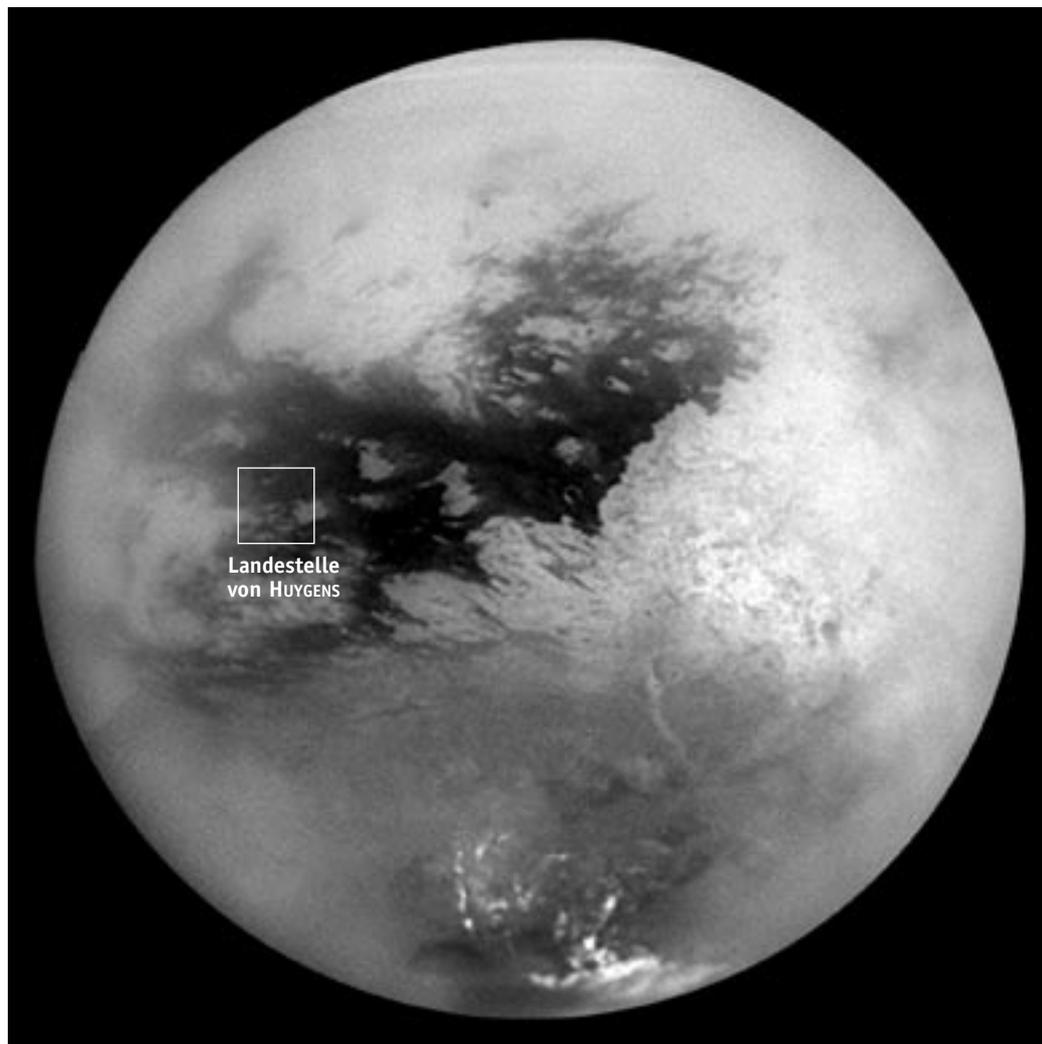
DISR (Descent Imager and Spectral Radiometer) nimmt mit Hilfe mehrerer Sensoren Bilder und Spektren der Umgebung und der Sonne auf. Es ist zu erwarten, dass die Bilder dieses Instruments die größte Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit erfahren werden. Details und Bilder zu diesem Experiment finden sich unter www.suw-online.de.

Die »Surface Science Package« (SSP) schließlich dient der Bestimmung der Oberflächeneigenschaften während des Aufpralls und nach der Landung, sofern die Sonde dabei nicht zerstört wird. Mit der SSP sollen verschiedene thermische, akustische, elektrische und optische Eigenschaften der Oberfläche gemessen werden. Eine Art Echolot sendet Signale aus, mit denen vielleicht die Tiefe eines Methansees bestimmt werden kann, falls HUYGENS in einer Flüssigkeit landen sollte. Außerdem soll die Abbremsung beim Aufprall und die Neigung der Sonde nach der Landung beziehungsweise ihr Schaukeln in möglichen Wellen bestimmt werden.

Ein dritter Fallschirm öffnet sich rund zehn Minuten nach dem Abwurf des Hitzeschildes. Er ist mit einem Durchmesser von etwa drei Metern kleiner als der

▶ Fast als Vollmond sah CASSINI Titan bei dieser Aufnahme im sichtbaren Licht. Es sind keine Oberflächenstrukturen erkennbar, dafür aber verschiedene Lagen von atmosphärischem Dunst, insbesondere in Nordpolnähe (im Bild oben). Die Insets zeigen VOYAGER-Aufnahmen aus dem Jahr 1980/81.

▼ Dieses aus neun Infrarot-Aufnahmen der ISS-Telekamera zusammengesetzte Bild zeigt die Oberfläche des Titan beim ersten CASSINI-Vorbeiflug im Oktober 2004 aus 650 000 bis 300 000 km Distanz, Norden ist oben. Wegen der Lichtstreuung in der Atmosphäre sind keinerlei Schatten zu sehen; sämtliche Hell-Dunkel-Strukturen sind Albedo- (Helligkeits-) Variationen auf der Oberfläche. Ausnahmen sind die helle Methanwolke am Südpol und die atmosphärenbedingte Kontrastabnahme zum Rand hin. Die Abwesenheit von Schattierungen macht die Interpretation der Daten äußerst schwierig.





zweite Schirm und erlaubt eine schnellere Sinkgeschwindigkeit. Dies ist notwendig, damit HUYGENS die Oberfläche erreichen kann, bevor der CASSINI-Orbiter hinter dem Horizont verschwindet. In 40 Kilometern Höhe kann Methan (CH_4) kondensieren, vielleicht bildet sich sogar Methanfrost auf HUYGENS. Unterhalb von 14 Kilometern verdunstet das Methan dann aber spätestens wieder. Die Landung soll nach etwa zweieinhalb Stunden Sinkzeit gegen 11:30 MEZ erfolgen, die Geschwindigkeit beträgt etwa 18 Kilometer pro Stunde. Dies wird die erste Landung in der Geschichte der Raumfahrt auf einer Oberfläche im äußeren Sonnensystem sein.

Sollte HUYGENS auf hartes Eis prallen, stehen die Chancen allerdings nicht sonderlich gut, dass die Sonde dies überlebt. Bei einer Landung auf weicherem Material oder sogar in einer Flüssigkeit wäre das anders. Dann könnte HUYGENS weiter Daten senden, eventuell noch über eine halbe Stunde lang. Doch dann wird es den Batterien bei etwa -180 Grad Celsius zu kalt, und die Stromversorgung von HUYGENS wird erfrieren. Bei einer Landung in einem »Methan-See« ist anzunehmen, dass HUYGENS nach einiger Zeit sinken würde. Der Orbiter selbst wird geduldig bis 14:59 MEZ seine Antenne auf die Landestelle gerichtet halten. Dann ist

CASSINI von HUYGENS aus gesehen unter dem Horizont verschwunden, und CASSINI kann seine große Antenne zur Erde ausrichten.

Der Beginn der ersten von mehreren Datenübertragungen ist im unmittelbaren zeitlichen Anschluss über die Empfangsstation in Canberra (Australien) geplant, die wenig später von der Station in Madrid abgelöst wird. Die Daten, die an Bord von CASSINI auf beiden Rekordern jeweils doppelt gespeichert sind, werden dann mehrfach zur Erde übertragen. Die beiden Rekorder sind gewissermaßen partitioniert, mit jeweils zwei Partitionen für im Prinzip identische Daten. »Im Prinzip« deshalb, weil HUYGENS zwei identische Datenströme parallel zum Orbiter sendet, die im Idealfall dieselben Inhalte haben müssten. Daten der Partition »B4«, also das erste Viertel, das demnach schon den kompletten HUYGENS-Datensatz beinhalten könnte, sollen gegen 19:00 MEZ Canberra vollständig erreicht haben.

Es folgen die Partitionen B5 – diese wird von Canberra und Madrid simultan empfangen – sowie dann über Madrid A4 und A5. Gegen 23:00 MEZ sollen dann alle gespeicherten Informationen einmal übermittelt worden sein. Ein zweites Herunterfunken schließt sich unmittelbar daran an und wird gegen 4:00 MEZ am

15. Januar abgeschlossen sein. Ein dritter Downlink folgt, der dann zunächst simultan von Madrid und Goldstone (Kalifornien, USA) und später ausschließlich von der Station in Goldstone aufgefangen wird.

Im Kontrollzentrum ESOC der Europäischen Weltraumbehörde ESA in Darmstadt werden die Daten sofort auf Vollständigkeit hin überprüft, und erst wenn jedes Bit von HUYGENS bestätigt ist, werden die Datenrekorder von CASSINI wieder für andere Aufgaben freigegeben. Die Kommandosequenz, welche den Downlink der HUYGENS-Daten lenkt, endet am 15. Januar um 18:17 MEZ. Kurz zuvor werden die wissenschaftlichen Experimente an Bord von CASSINI wieder eingeschaltet.

Es gibt ein Leben nach der HUYGENS-Mission

Auch wenn aller Voraussicht nach in diesen spannenden Tagen der Eindruck entstehen dürfte, dass jetzt »alles« erledigt sei: Es gibt für CASSINI ein Leben nach der HUYGENS-Mission. Man könnte auch sagen, dass jetzt die CASSINI-Mission erst richtig beginnt. Für die hochempfindlichen Instrumente, welche die Felder und Teilchen im Saturnsystem messen, ist es sogar von Vorteil, dass HUYGENS nicht mehr da ist.



▲ Das einzige Instrument an Bord von CASSINI, das die Titanoberfläche »ungetrübt« untersuchen kann, ist das RADAR-Instrument. Aber auch hier gestaltet sich die Interpretation der Daten schwierig. Ist die große runde Struktur links im Bild ein Einschlagskrater oder »kryovulkanischen« Ursprungs? Was sind die hellen Dreiecke, die an Schuttfächer von Flüssen erinnern? Sind die dunkelsten Stellen Methanseen? Warum sind keine Kraterstrukturen erkennbar? Die Aufnahme zeigt etwa $\frac{1}{2}$ km große Details und wurde beim TA-Vorbeiflug Ende Oktober aus etwa 1200 km Distanz gewonnen.

▶ Die bislang besten Bilder vom Mond Enceladus stammen von der Sonde VOYAGER 2 und zeigen nördliche Teile der Heckseite und der saturnzugewandten Hemisphäre. Rätselhafterweise erschienen weite Teile der Oberfläche kraterfrei. Im Februar 2005 soll CASSINI diese Region aus ähnlicher Perspektive in einem aus 14 Bildern bestehenden Mosaik aufnehmen.



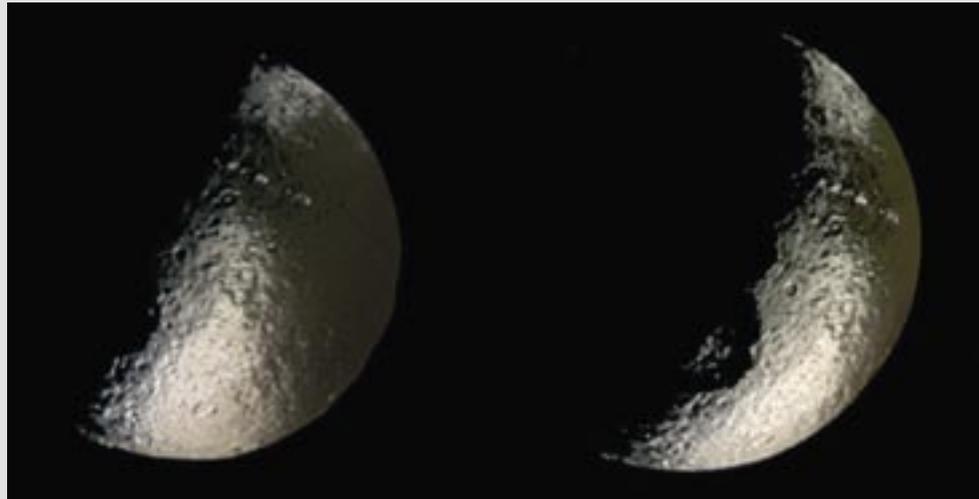
Iapetus steht sich selbst im Weg

Der Saturnmond Iapetus ist seit seiner Entdeckung durch den Astronomen Jean-Dominique Cassini (1625–1712) im Jahre 1671 als Sonderling bekannt. Nicht nur seine ungewöhnliche Bahn, die ihn in langen 80 Tagen um Saturn führt, sondern vor allem der extreme Helligkeitsunterschied auf der Oberfläche sind Markenzeichen, die sonst im Sonnensystem nicht anzutreffen sind. Schon Cassini erkannte diese »globale Albedo-Dichotomie«; er hatte große Schwierigkeiten, Iapetus auf der östlichen Seite seiner Bahn überhaupt zu sehen. Cassini zog die korrekte Schlussfolgerung, dass Iapetus nicht nur gebunden rotiert, sondern dass auch seine vorauseilende Seite sehr viel dunkler sein müsse als die »Heckseite«.

Bereits seit 333 Jahren ist das Iapetusrätsel gleichermaßen bekannt wie ungelöst. Zahlreiche Theorien und Hypothesen wurden in den letzten 30 Jahren zu diesem planetologischen Problem publiziert, insbesondere nachdem niedrig aufgelöste Aufnahmen der beiden VOYAGER-Raumsonden Anfang der achtziger Jahre erstmals rudimentäre Einblicke in die geologische Geschichte dieses Mondes erlaubten. So könnte helles Material auf der »Bugseite« erodiert oder dunkles Material abgelagert worden sein. Alternativ wurden Einschläge auf der Bugseite, auf der Heckseite, auf dem weiter innen umlaufenden Mond Hyperion, auf einem äußeren Saturnmond und sogar auf Titan als Quelle für eine Decke aus dunklem Material vorgeschlagen.

Am Abend des 15. Januar, also schon gut einen Tag nach der HUYGENS-Landung, beginnt ein wichtiges Beobachtungsegment für andere Monde. Dabei sollen insbesondere Enceladus, Mimas und Rhea untersucht werden. Ob diese Beobachtungen stattfinden, hängt entscheidend davon ab, ob alle Daten von HUYGENS ordnungsgemäß die Erde erreicht haben. Für alle drei Monde werden die Bilder zum Teil erheblich schärfer sein als alles, was bisher von CASSINI oder VOYAGER aufgenommen wurde. Deshalb besitzen diese Beobachtungen auch für das Projekt eine besondere Priorität.

Der etwa 400 Kilometer große Mond Mimas soll am 15. und 16. Januar fünf Mal beobachtet werden. Die erste Sequenz zeigt dabei den markanten Krater Herschel mit einer Bildauflösung von etwa zweieinhalb Kilometern pro Pixel. Die schärfsten Bilder von Mimas werden einige Stunden später gewonnen und er-



Recht hartnäckig hält sich die These, dass Staub vom äußeren, in die »falsche« Richtung umlaufenden Mond Phoebe oder einem seiner im Jahr 2000 entdeckten Geschwister nach innen »spiralt« und im Gegenverkehr von Iapetus' Bugseite als erstem »Hindernis« aufgesammelt wird. Was auch immer in der Vergangenheit geschehen sein mag, alle bisherigen Thesen haben erhebliche Schwierigkeiten bei der Erklärung von Details. Als einzige Gemeinsamkeit ist festzustellen, dass keine von ihnen allgemein akzeptiert ist. Nicht einmal eine »wahrscheinlichste« Hypothese gibt es.

Doch die Chancen stehen gut, dass sich das in nicht allzuferner Zukunft ändert. Die Raumsonde CASSINI kreist im Saturnsystem, und infolge eines Versäumnisses bei der Entwicklung der HUYGENS-Sonde wurde

▲ Diese bislang besten Aufnahmen der saturnabgewandten Seite des Mondes Iapetus wurden von der Sonde CASSINI Mitte Oktober gewonnen und zeigen die komplexe Übergangsregion zwischen dunklem und hellem Gebiet auf der saturnabgewandten Hemisphäre. Deutlich sind Krater im Übergangsgebiet sowie in den hellen Regionen zu erkennen, und ein im August entdeckter Riesenkater von etwa 400 km Durchmesser rotiert ins Sonnenlicht. Die hellen Flecken am Äquator sind riesige Berge. Wie es jedoch tief im dunklen Gebiet aussieht, haben die Daten noch nicht eindeutig verraten.

reichen einen Kilometer pro Pixel. Sie zeigen den saturnabgewandten Teil der Heckseite als »Halbmond«.

Für Enceladus sind vier Sequenzen vorgesehen. Dabei werden weite Teile der Bugseite abgedeckt, welche bislang noch als »weiße Flecken« auf der Landkarte erscheinen. Die schärfsten Bilder sollen 1,4 Kilometer pro Pixel erreichen und Enceladus als »abnehmende Mondsichel« zeigen.

Rhea schließlich wird sogar sechs Mal anvisiert. Bislang weitgehend unbekanntes Terrain auf der südlichen saturnzugewandten Seite soll mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 860 Metern photographiert werden.

Sollten diese Aufnahmen gelingen, wäre Hyperion der einzige verbliebene der neun »klassischen« Saturnmonde, von dem CASSINI noch keine Aufnahmen gewonnen hat, welche die VOYAGER-Daten übertreffen. Von Phoebe gelangen ja bereits im Juni erste scharfe Aufnahmen,

von Tethys Ende Oktober, und für Dione waren Bildmosaiken für den 14. und 15. Dezember geplant. Aber auch auf Hyperion müssen wir nicht mehr allzulange warten, denn am 10. Juni 2005 wird CASSINI diesen Mond in 166 000 Kilometer Distanz passieren und ausführlich studieren. Und für den 26. September 2005 steht dann ein gezielter Hyperion-Vorbeiflug auf dem Plan.

Von Umlauf C bis Umlauf 3

Die Zeitdauer für eine Saturnumkreisung ist jetzt auf knapp 32 Tage gesunken. Der Periapsispunkt von Orbit C wird am 16. Januar durchflogen, und bei Orbit 3 schon einen Monat später, am 17. Februar. Die Apoapsis wird am 1. Februar in 3,5 Millionen Kilometern Distanz erreicht. Dies ist dieselbe Entfernung wie im Orbit C, da der Titanvorbeiflug am 14. Januar in einer so großen Entfernung erfolgt, dass die Bahn von CASSINI kaum beeinflusst wird.

uns ein vergleichsweise naher Iapetus-Vorbeiflug in der kommenden Neujahrnacht 2004/2005 geschenkt. Denn zu Beginn des Jahres 2000 stellte sich heraus, dass die Dopplerverschiebung der Funksignale von HUYGENS diese für den Empfänger an Bord von CASSINI zu einem erheblichen Teil unerkennbar und somit nutzlos gemacht hätte.

Dieser Fehler bei der Konstruktion des Empfängers an Bord von CASSINI war auf geheimnisvolle Weise an allen Kontrollen vorbei unbemerkt bis ins Weltall gelangt. Die fast schon genial zu nennende Lösung war, CASSINI eine Extrarunde zu gönnen und somit am 14. Januar 2005 einen Titan-Vorbeiflug »frei« zu haben, der in so großer Entfernung stattfindet (60 000 km), dass der Doppler-Effekt keine Probleme mehr bereitet.

Auch wenn das Problem mit HUYGENS den Verantwortlichen extremes Kopfzerbrechen bereitete, für die Iapetus-Forschung könnte es ein »Geschenk des Himmels« werden. Denn in der ursprünglichen Flugbahn sollte CASSINI Iapetus Anfang Januar 2005 bis auf 670 000 Kilometer nahe kommen, gerade gut genug für Aufnahmen mit einer Auflösung von vier Kilometer pro Pixel. Bei einem Iapetus-Durchmesser von 1440 km hätte das 360 Bildpunkten entsprochen. Da CASSINI jetzt aber schon zwei Tage früher an Iapetus vorbeikommt, war die geringste Distanz auf 55300 Kilometer gesunken, was eine Bildauflösung von bis zu 330 Metern pro Pixel bedeutet hätte. Das, so glaubten wir Planer bis Mitte September 2004, wird

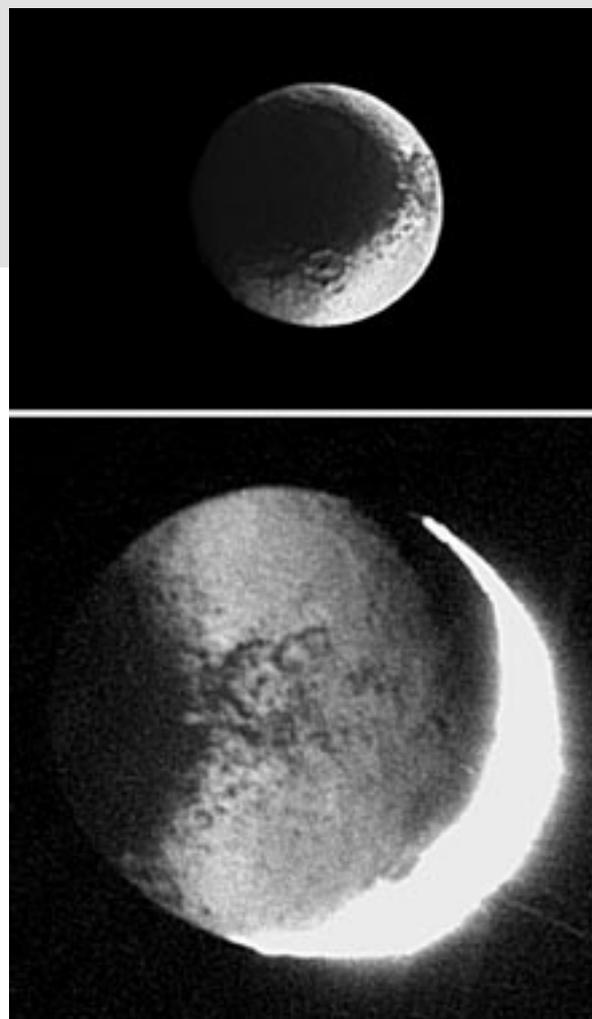
es sein. Zwar existieren bis zum Schluss große Unsicherheiten; wenn beispielsweise das Absetzen der HUYGENS-Sonde kurzfristig verschoben werden müsste oder das Hochfunktken der Kommandosequenz für Iapetus einen Tag vor der Ausführung aus irgendeinem Grund fehl schlägt, würden überhaupt keine Beobachtungen stattfinden. Aber wir sind zuversichtlich.

Doch dann tauchte ein ganz anderes Problem auf, noch einmal war HUYGENS darin verwickelt. Der Iapetus-Vorbeiflug liegt insofern zeitlich sehr günstig, dass alle Aktivitäten in Bezug auf die Trennung von CASSINI und HUYGENS vorher ausgeführt werden können, die eigentliche HUYGENS-Mission selbst aber erst zwei Wochen später stattfindet. Vor einigen Monaten hatte jedoch ein Mitarbeiter im CASSINI-Navigationsteam am JPL aus quasi allen verfügbaren astronomischen Messdaten berechnet, dass die Masse von Iapetus etwas höher sein muss als bisher angenommen. Das wäre nicht weiter schlimm, wenn diese »neue Masse« nicht außerhalb der Fehlerbalken der bisherigen Angabe gelegen hätte, und – als eigentlicher Knackpunkt – der neue Fehler nicht deutlich größer gewesen wäre als der alte.

Man muss dazu beachten, dass nicht nur CASSINI an Iapetus vorbeifliegt, sondern auch HUYGENS. Die beiden Sonden trennen sich am 25. Dezember 2004 voneinander, laufen aber dann auf sehr ähnlichen Bahnen. Bei einem $1.94 \times 10^{21} \text{ kg} \pm 13\%$ schweren Mond hat ein Vorbeiflug in 62 300 Kilometer Abstand zwar keinen besonders großen

Effekt auf einen Raumflugkörper, aber wenn es darum geht, dass CASSINI die HUYGENS-Sonde für einen sicheren Eintritt auf $65^\circ \pm 3^\circ$ genau in der Titanatmosphäre platzieren muss und dass CASSINI von sich aus diesen Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent bis auf ± 2.4 Grad genau einhalten kann, dann kann ein 13 Prozent schwererer oder leichterer Iapetus bewirken, dass die Toleranzgrenze von ± 3 Grad überschritten wird. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist gering, aber der Erfolgsdruck für HUYGENS groß.

▼ Oben: Das erste Iapetusbild aus der Saturnumlaufbahn enthüllte eine riesige, 550 km durchmessende Impaktstruktur im dunklen Gebiet. Unten: Iapetus im Licht von Saturn! Obwohl der Ringplanet 3.5 Mio. km entfernt ist, gelang diese Aufnahme, bei der der saturnzugewandte Teil der hellen Hemisphäre in bislang ungekannter Detailgenauigkeit zu sehen ist. Die Belichtungszeit betrug drei Minuten; dieser Wert zeigt, wie exakt CASSINI bewegte Objekte nachführen kann.



Auf dem Weg von Saturn weg werden zunächst die Monde weiter studiert. Bis Ende 2007 sind immer wieder einige wenige Tage dauernde Missionsabschnitte speziellen Beobachtungen der Monde unter verschiedenen Phasenwinkeln gewidmet. Diese werden es erlauben, die Helligkeiten der Monde Mimas, Enceladus, Tethys, Dione und Rhea unter vielen verschiedenen Beleuchtungsbedingungen zu untersuchen, um daraus Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften der Oberflächen zu ziehen.

Hierbei wurde darauf geachtet, dass jeweils dieselbe Region der Oberfläche zu sehen ist. Für Mitte Januar ist die erste dieser Sequenzen geplant. Außerdem wechseln sich Beobachtungen der Ringe sowie Saturn-Atmosphären- und Polarlicht-Untersuchungen ab. Immer wieder sind auch Beobachtungen eingeplant, bei denen die Magnetfeldmessinstrumente die Ausrichtung der CASSINI-Son-

de diktieren. Am 22. Januar beginnt die Kommandosequenz S08, CASSINI zu lenken.

Zurück zu Titan, vorbei an Enceladus

Anfang Februar nähert sich CASSINI Saturn wieder an, wobei zuerst neun Tage lang intensive Studien der Saturnatmosphäre vorgesehen sind. Am 14. Februar beginnt dann das dritte Titan-Segment der CASSINI-Mission. Der Vorbeiflug erfolgt einen Tag später in 1580 Kilometern Distanz zur Oberfläche. Ursprünglich war geplant, die Atmosphäre Titans durch ein Radio-Bedeckungsexperiment zu untersuchen. Wegen der kurzfristig geänderten Flugbahn ist dies aber nicht mehr möglich, weil die Erde von CASSINI aus gesehen jetzt doch nicht hinter Titan verschwindet. Auch unter dem Eindruck der Titan-A-Daten von Ende Oktober wurde dieser Vorbeiflug daher an das RADAR-Experiment weitergegeben.

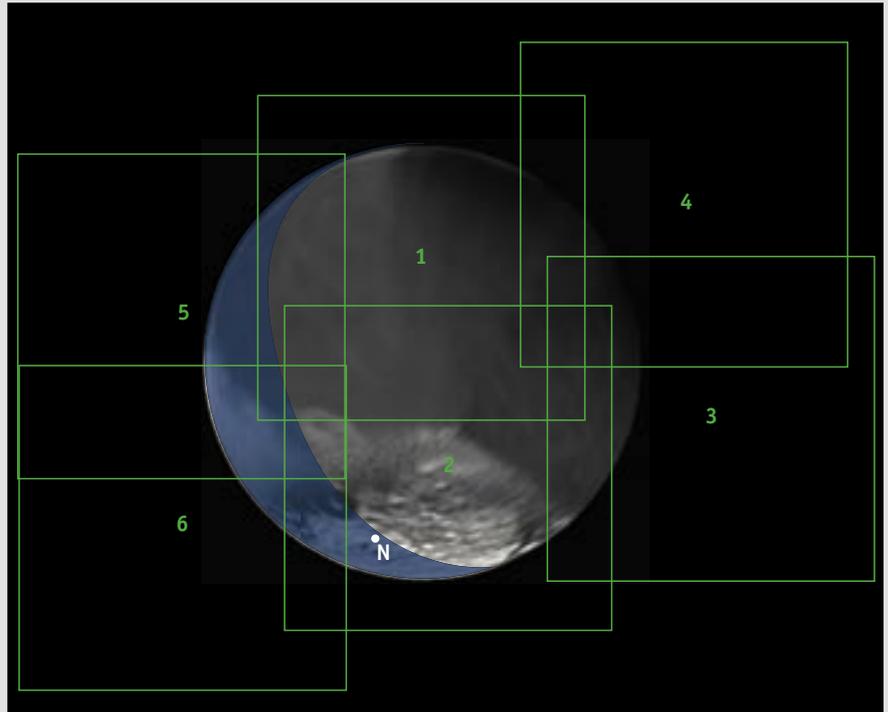
Iapetus steht sich selbst im Weg (Fortsetzung)

Daher wurde klar, dass etwas unternommen werden musste. Aber was? Es gab mehrere Alternativen.

Beispielsweise hätte man die HUYGENS-Mission auf den 15. Februar 2005 verschieben können. Das hätte die gesamte Flugbahn von CASSINI bis August 2005 durcheinandergebracht und monatelange Planungen obsolet gemacht. Keine attraktive Idee also. Eine zweite Möglichkeit wäre gewesen, HUYGENS erst nach dem Iapetus-Vorbeiflug abzusetzen. Dies hätte aber für das »Deflection Maneuver« einen immensen Treibstoffaufwand bedeutet, und die Iapetus-Beobachtungen wären wohl gestorben – auch nicht attraktiv. Drittens wäre möglich gewesen, Bahnverfolgungsdaten vom fernen Vorbeiflug Mitte Oktober 2004 zu verwenden, um den Fehler bei der Iapetus-Masse einzugrenzen. Diese Variante wäre ideal gewesen, hatte aber den Nachteil, dass in dem Fall, dass die verbesserte Massenbestimmung aus irgendeinem Grund misslungen wäre, das neue Problem mit HUYGENS ungelöst geblieben wäre.

Verblieb also nur die vierte Variante, Iapetus musste für HUYGENS »aus dem Weg geräumt« werden. Hierfür wurde die Vorbeiflugdistanz von HUYGENS an Iapetus (und somit leider auch die von CASSINI) auf 121100 Kilometer erhöht (bzw. 117500 km für den Orbiter). Damit verringert sich der Einfluss der Iapetus-Masse auf die HUYGENS-Mission in dem Maße, wie es für ein sicheres Absetzen notwendig ist.

Für die Fernerkundung von Iapetus aber bedeutet das, dass die schärfsten Bilder



höchstens 710 Meter pro Pixel erreichen werden. Außerdem werden hohe nördliche Breiten überflogen anstatt niedere südliche. Der Nordpol selbst befindet sich aufgrund der Saturnjahreszeiten im Schatten, so dass der beobachtbare Anteil an hellem Oberflächenmaterial sehr viel geringer sein wird, als es im Falle einer Passage über der Südhemisphäre der Fall gewesen wäre. Die größte Annäherung erfolgt bereits 6,5 Stunden früher als in der ursprünglichen Variante und somit noch im alten Jahr. Zum

Glück erwies sich die Beobachtungsplanung als robust gegen diese Verschiebung, denn Änderungen im Zeitablauf der Beobachtungen wären zu diesem späten Zeitpunkt so gut wie unmöglich gewesen.

HUYGENS spielte also bereits doppelt Schicksal für Iapetus. Hat das Kommunikationsproblem uns erst den vergleichsweise nahen Vorbeiflug ermöglicht, so stand jetzt Iapetus seiner Erforschung gewissermaßen selbst im Weg. Hoffen wir, dass HUYGENS nicht noch ein drittes Mal eingreift. Denn

Diesmal ist eine östlich der HUYGENS-Landestelle gelegene Region zu sehen. Die optischen Fernerkundungsinstrumente sollen nach dem gegenwärtigen Stand der Planung Titan einige Stunden vor der größten Annäherung aus über 100000 Kilometern Distanz bei nur 20 Grad Phasenwinkel untersuchen. Ihre Daten werden anschließend zur Erde übertragen. 90 Minuten bis 59 Minuten vor dem Vorbeiflug sinkt der Abstand von 29000 Kilometer auf 20000 Kilometer, dieser Zeitraum wird noch einmal von den Kameras genutzt. Anschließend führt dann das RADAR fast zwei Stunden lang Beobachtungen durch, den Großteil davon auf der saturnzugewandten Hemisphäre.

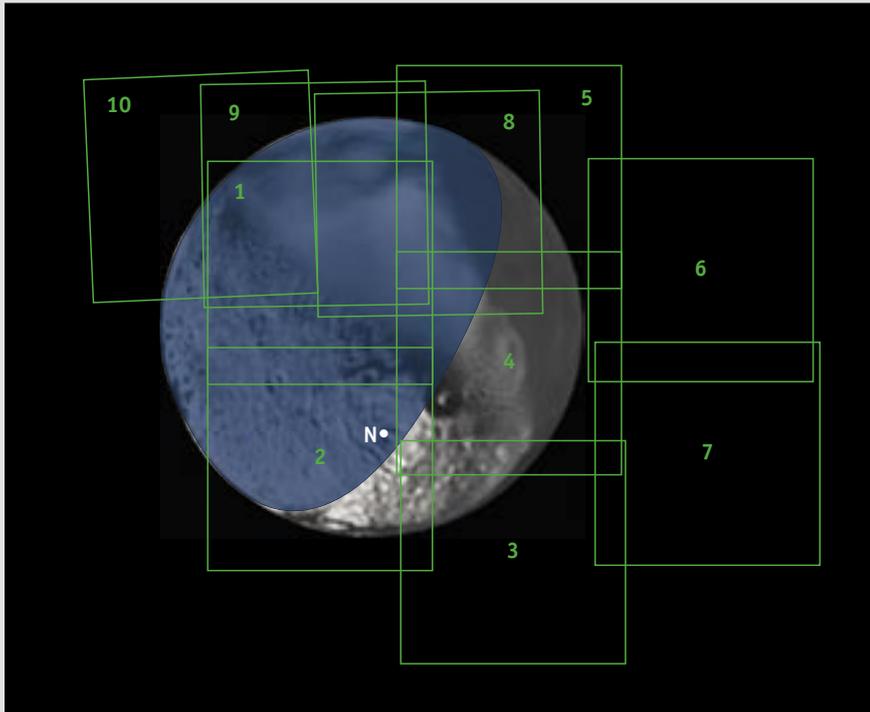
Für die Datenübertragung bleibt kaum Zeit, denn schon nähert sich CASSINI seinem nächsten Ziel, dem merkwürdigen Mond Enceladus. Enceladus ist zwar nur etwa 500 Kilometer klein, gerade deshalb ist es aber umso schwieriger zu erklären, warum weite Bereiche seiner Oberfläche

in den Bildern von VOYAGER kraterfrei erschienen. Am 17. Februar soll CASSINI um 4:30 MEZ der Oberfläche bis auf 1180 Kilometer nahe kommen, und das bei einem »ungezielten« Vorbeiflug!

Der Unterschied zwischen einem »gezielten« und einem »ungezielten« Vorbeiflug ist, dass bei ersterem der gewünschte Vorbeiflugabstand »erzwungen« wird. Das heißt, wenn beispielsweise die Bahnbestimmung eines Mondes verbessert wurde, muss die Flugbahn von CASSINI daran angepasst werden. Bei einem »ungezielten« Vorbeiflug hingegen ändert sie sich in zufälliger Weise. Die wohl einzige Ausnahme ist dieser Enceladus-Vorbeiflug, der trotz erheblicher Bahnänderungen »gerettet« wurde.

Derart nahe Passagen an diesem Mond sind unter den Wissenschaftlern heftig umkämpft. Nicht nur die Fernerkundungsinstrumente erhalten die besten Daten bei geringen Distanzen, sondern auch eine Massenbestimmung durch prä-

zise Vermessung der CASSINI-Bahn kann in einem solchen Fall am besten durchgeführt werden. Das ist gerade für Enceladus wichtig, da seine Masse viel ungenauer bekannt ist als diejenige der anderen Monde. Das RADAR-Experiment profitiert von einer geringen Distanz, weil sich das Signal/Rauschverhältnis der Daten verbessert, und im Falle von Enceladus kommt noch hinzu, dass er als Quelle des E-Rings von Saturn angesehen wird. Der E-Ring ist ein feiner Partikelring, der von innerhalb der Enceladus-Bahn bis etwa zur Bahn von Rhea reicht. Da wundert es nicht, wenn die Vermessung dieses Ringes die höchste Priorität für den aus Heidelberg stammenden Staubbildetektor CDA besitzt (siehe SuW 9/2004, S. 20). Gleiches gilt auch für das Projektmanagement, denn bislang ist noch nicht sicher, wie gefährlich ein Durchflug des E-Rings für CASSINI tatsächlich ist. Zur Zeit ist geplant, Elektronik und Triebwerke von CASSINI durch eine Fluglage mit der An-



◀ Während wir Erdlinge bei Sekt und Feuerwerk das neue Jahr begrüßen, soll CASSINI Bilder des Saturnmondes Iapetus aufnehmen und zur Erde überspielen, die zehn Mal schärfer sind als alle bisherigen Photographien. Die Graphiken zeigen zwei der acht geplanten Bildmosaik der ISS-Kamera, die Rahmen zeigen das Bildfeld der ISS-Telekamera an. Die Aufnahmen zeigen Gebiete auf der nördlichen Hälfte der vorauselenden Hemisphäre. Die saturnzugewandte Seite soll im Graulicht von Saturn fotografiert werden.

jede Verzögerung des Absetzens von HUYGENS hätte fast unausweichlich ein Streichen der Iapetus-Beobachtungen zur Folge.

Trotz allem gilt: Eine Auflösung von 710 Meter pro Pixel ist immer noch beinahe zehnfach besser als alle Daten, die bislang vorliegen. Mit den Bildern sollte es beispielsweise möglich sein, die Kraterverteilung (genauer: Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung) auf Teilen der dunklen wie der hellen Hemisphäre zu bestimmen, was wichtige Aufschlüsse über die relativen Oberflä-

chenalter liefern könnte: Ist die Dichotomie ein altes oder ein junges Phänomen? Vielleicht gelingt es auch, die Schichtdicke des dunklen Materials zu messen – sind es Millimeter, Meter, Kilometer? – falls es das Dunkle ist, das obenauf liegt.

Allein diese beiden Messungen könnten schon eine Reihe von Entstehungstheorien ausschließen oder unterstützen. Die Spektrometer an Bord von CASSINI können Aufschlüsse über die Oberflächenchemie und die Materialverteilung geben, das RADAR-Ex-

periment über physikalische Eigenschaften der Oberfläche und eventuell ebenfalls über die Schichtdicke des dunklen Materials. Jedes Experiment auf dem Orbiter wird so auf die eine oder andere Weise sein Scherflein beitragen. Und für alle auch am 2. Januar noch ungelösten Rätsel bleibt die phantastische Aussicht, dass für CASSINI am 10. September 2007 ein wirklich naher Iapetus-Vorbeiflug in etwa 1000 Kilometer bis 1500 Kilometer Distanz vorgesehen ist! (Hier legen wir uns mal zum heutigen Zeitpunkt besser noch nicht genauer fest...)

Nachtrag: Die Massenbestimmung konnte mit Hilfe des Oktober-Vorbeiflugs verbessert werden. Der jetzt beste Wert beträgt $1.81 \times 10^{21} \text{ kg} \pm 3\%$. Nach dem Neujahrsvorbeiflug dürfte er noch genauer bestimmt sein.

tenne voraus vor den E-Ring-Partikeln zu schützen.

Vier Gelegenheiten für ein nahes Rendezvous mit Enceladus wird CASSINI während der gesamten vierjährigen Saturnrundreise erhalten. Beim nahen Vorbeiflug in Orbit 3 erhalten der Staubdetektor und die Bahnvermessung zur Massenbestimmung höchste Priorität. Außerdem soll parallel zu den CDA-Messungen mit dem Ultraviolett-Spektrometer UVIS nach einer möglichen dünnen Atmosphäre dieses Mondes gesucht werden.

Die Erkundungen im Orbit 4 am 9. März 2005 werden von den Fernerkundungsinstrumenten dominiert, und aus größerer Distanz soll es auch eine RADAR-Beobachtung geben. Der Vorbeiflug im Orbit 11 (am 14. Juli) »gehört« dann ebenfalls den Fernerkundungsinstrumenten, wobei die Dreiviertelstunde um die größte Annäherung herum erneut zur Suche nach einer möglichen dünnen Atmosphäre mit Hilfe von UVIS genutzt wird.

Der erst für den 12. März 2008 in nur 100 Kilometern Abstand (!) geplante Vorbeiflug wird von den Felder- und Partikelmessinstrumenten sowie dem RADAR-Experiment diktiert. Hierbei tritt Enceladus in den Saturnschatten ein, und der Vorbeiflug erfolgt fast senkrecht zur Bahn von Enceladus. Dennoch wird es auch Beobachtungen durch die Kamera geben. Die Enceladus-Finsternis ist eine sehr gute Gelegenheit für das Infrarot-Spektrometer CIRS, das thermische Verhalten der Oberfläche zu messen.

Obwohl die Fernerkundung beim Vorbeiflug im Februar nicht die oberste Priorität hat, sind dennoch Aufnahmen geplant, welche bis zu 70 Meter kleine Details zeigen könnten. Das überflogene Gebiet ist zum Teil identisch mit der Region, die in den Bildern von VOYAGER als sehr kraterarm identifiziert wurde. Eine Unsicherheit gibt es allerdings: Da eine winzige Bahnungenauigkeit beim Anflug auf Titan zwei Tage zuvor in eine erheb-

liche Bahnungenauigkeit für diesen Enceladus-Vorbeiflug münden kann – die Vorbeiflugdistanz wird mit 1178 Kilometer ± 207 Kilometer angegeben! –, ist noch unklar, wie exakt die Kameras von CASSINI letztlich zielen werden. Zumindest etwa eine Hälfte von Enceladus werden wir aber mit großer Wahrscheinlichkeit erwischen. □



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.