

Cassinis großes Finale

Nach rund 20 Jahren im Weltall und mehr als 13 Jahren im Umlauf um Saturn geht die Mission der Raumsonde Cassini nun zu Ende: Am 15. September wird sie in der Atmosphäre des Ringgiganten verglühen. In ihren letzten Monaten wird uns Cassini jedoch noch einmal völlig neue Informationen und einzigartige Ansichten des Planeten sowie seiner Ringe und Monde liefern und dabei sogar durch die schmale Lücke zwischen dem Planeten und seinen Ringen hindurchfliegen.

IN KÜRZE

- Bevor ihre Mission zu Ende geht, fliegt die Sonde Cassini näher an den Saturn und seine Ringe heran als in den 13 Jahren zuvor.
- Durch die veränderte Bahn lassen sich Details in den komplex aufgebauten Ringen mit bisher nicht erreichter Genauigkeit untersuchen.
- Die Messungen sollen insbesondere die Masse, das Alter und die Dynamik der Saturnringe aufklären.

In der Endphase

In den letzten Monaten ihrer Mission kommt die Raumsonde Cassini bis auf wenige tausend Kilometer an die Wolkenoberfläche des Saturn heran und fliegt dabei durch die enge Lücke zwischen den Ringen und dem Planeten hindurch. Dies eröffnet völlig neue Perspektiven für die Beobachtungen.

Majestätisch hängt der sandfarbene Ball des Saturn im All, umschlossen von seinen riesigen Ringen. Ein scheinbar ruhiges Bild für die Ewigkeit, doch plötzlich wird diese ätherische Szene jäh gestört: Eine grelle Feuerkugel leuchtet unvermittelt auf, von Norden kommend bewegt sie sich rasend schnell die Wolken entlang – um bereits nach wenigen Sekunden wieder zu verlöschen. Fand hier gerade ein Meteoroid oder ein Brocken aus den Saturnringen sein feuriges Ende? Nein, nicht in diesem Fall: Diese Feuerkugel wird menschengemacht sein. Sie kennzeichnet die letzten Sekunden der Existenz der Raumsonde Cassini, die im Oktober 1997 auf ihre lange Reise geschickt wurde und seit Juli 2004 den Ringplaneten auf ständig veränderten Bahnen umrundet hat. Und ihr Ende am 15. September 2017 erfolgt nicht zufällig, sondern ist der krönende Abschluss einer scharfsinnigen Choreografie, die 20 Jahre zuvor begonnen hat.

Die Hauptaufgabe der internationalen Raumsondenmission Cassini-Huygens bestand in der Erforschung der vielfältigen Eigenschaften des Ringplaneten Saturn. Dazu wurde sie mit einer Vielzahl von wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet. Damit untersuchte Cassini die Atmosphäre des Planeten, den inneren Aufbau und das Magnetfeld. Ein besonderes Augenmerk war auf die Erkundung der zahlreichen Saturnmonde und des komplexen Ringsystems gerichtet. Meine Aufgaben im Kamerateam und für das Projekt umfassten unter anderem die Erforschung der kleinen äußeren Saturnmonde und des »zweifarbigen« Mondes Iapetus sowie die Beobachtungsplanung für die atmosphärelosen Monde.

Bis Weihnachten 2004 begleitete den Cassini-Orbiter die europäische Eintauchsonde Huygens, die am 14. Januar 2005 ihre bis heute einzigartige Mission in der Atmosphäre des größten Saturnmonds Titan erfüllte (siehe SuW 3/2015, S. 22).

Der Orbiter, den die US-Raumfahrtbehörde NASA am Jet Propulsion Laboratory (JPL) im kalifornischen Pasadena entwickeln ließ, und der auch von dort aus gesteuert wird, erkundet das Saturnsystem seit mehr als 13 Jahren fast ohne Pause. In dieser Zeit – von Februar 2004 bis Mitte März 2017 – wurde nicht nur der

Planet 266-mal umkreist, sondern Cassini flog auch die großen Monde über 160-mal gezielt an. Ursprünglich auf eine Aufenthaltsdauer von vier Jahren angelegt, wurde die Mission zweimal verlängert: zunächst im Jahr 2008 für rund zwei Jahre, und danach nochmals für weitere sieben Jahre. Somit erstreckte sich die Missionsdauer auf annähernd ein halbes Saturnjahr, das 29,5 Jahre dauert. Saturn durchläuft wie die Erde wegen seiner Achsenneigung von fast 27 Grad ausgeprägte Jahreszeiten, die allerdings jeweils etwa 7,5 Jahre lang sind. Während der ersten Verlängerung konnte Cassini im August 2009 die Tagundnachtgleiche auf Saturn fotografieren (siehe Bild rechts). Von der Erde aus gesehen befand sich das Ringsystem zu diesem Zeitpunkt in Kantenstellung, so dass die Ringe, falls überhaupt, nur als hauchfeiner Strich am Äquator erschienen. Am 25. Mai 2017, wenn auf der Nordhalbkugel mit der Sonnenwende der Sommer beginnt, wird Cassini noch immer vor Ort sein.

Während der Mission wurden mit den Haupttriebwerken mehrere hundert Bahnkorrekturmanöver durchgeführt; dabei kam Cassini in der gesamten Zeit kein einziges Mal vom vorgegebenen Kurs ab (siehe Bild S. 31 unten)! Alles in allem befindet sich die Sonde, die in den rund 20 Jahren seit dem Start keine Werkstatt anfliegen konnte, in einem bemerkenswert guten technischen Zustand. Mit Füllständen von weniger als einem Prozent für Treibstoff und Oxidator sind diese für die Bahnregelung benötigten Betriebsstoffe jetzt annähernd erschöpft, vom Hydrazin aus dem Tank für die Lagekontrolldüsen ist immerhin noch mehr als ein Drittel der ursprünglichen Menge vorhanden. Die drei Radioisotopengeneratoren (RTGs) der Stromversorgung liefern noch etwas mehr als 600 Watt an elektrischer Leistung, was rund 70 Prozent der Leistung beim Start entspricht.

Neue Perspektiven

Ogleich Cassini nun schon sehr lange den Saturn umkreist, geschieht in den letzten zehn Monaten der Mission noch einmal etwas komplett Neues. Mit Beginn dieser Phase im November 2016 wurde der saturnnächste Punkt der Umlaufbahn, die so genannte Periapsis, zunächst bis auf 150000 Kilometer (rund 40 Prozent der Entfernung Erde-Mond) über der

Wolkenoberfläche des Riesenplaneten abgesenkt. Somit passiert Cassini bei ihren Umläufen die Außenkante des Hauptrings in Abständen von weniger als 15000 Kilometern. Dabei kommt sie bis auf etwa 10000 Kilometer an den von den beiden Monden Prometheus und Pandora stabilisierten F-Ring heran, der sich außerhalb der Hauptringe befindet (siehe Kasten S. 32 oben).

Der Periapsispunkt der Cassinibahn liegt ein wenig südlich der Ringebene über der beleuchteten Planetenseite etwa bei 12 Uhr Mittag lokaler Saturnzeit. Durch diese Bahnlage lässt sich Cassini von der Erde aus direkt verfolgen; zudem ergeben sich gute Möglichkeiten für Bedeckungsexperimente mit den Ringen. Dabei schieben sich aus Sicht der Sonde die Ringe vor die Erde, die Sonne oder einen hellen Stern. Während Cassini Saturn jedes Mal von Norden her über der beleuchteten Seite der Ringe anfliegt, entfernt sie sich in Richtung Süden über der unbeleuchteten Ringseite. Hier lässt sich dann auch das

NASA/JPL/SSI





NASA / JPL / SSI

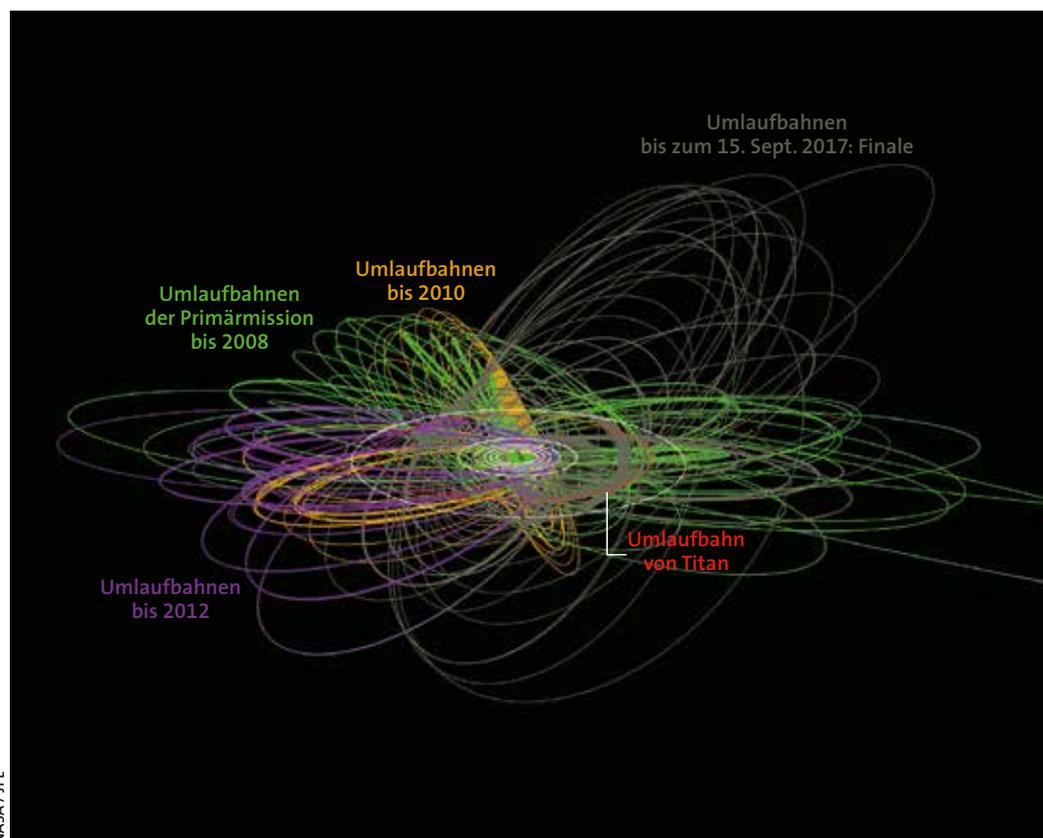
Äquinoktium

Am 11. August 2009 ereignete sich zuletzt die Tagundnachtgleiche (das Äquinoktium) auf Saturn. Dabei standen die Ringe in Kantstellung, wodurch das Sonnenlicht parallel zur Ringebene einfiel. Für die Cassini-Sonde wären die Ringe deshalb unsichtbar geblieben; doch sie schimmern in diffusem Schein, da der Planet selbst etwas Sonnenlicht auf die Ringe reflektiert. Für das Bildmosaik aus 76 Einzelaufnahmen wurde der Bereich der Ringe, der von der Saturnkugel noch angeleuchtet wird, um den Faktor 20 aufgehellt, der auf der Nachtseite gelegene Teil sogar um den Faktor 60.

Eingesponnen

Die Raumsonde Cassini wird bis zu ihrem Ende Mitte September Saturn 294-mal umrundet haben. Dabei hat sie den Planeten mit ihren ständig veränderten Umlaufbahnen wie in einen Kokon eingewoben.

NASA / JPL



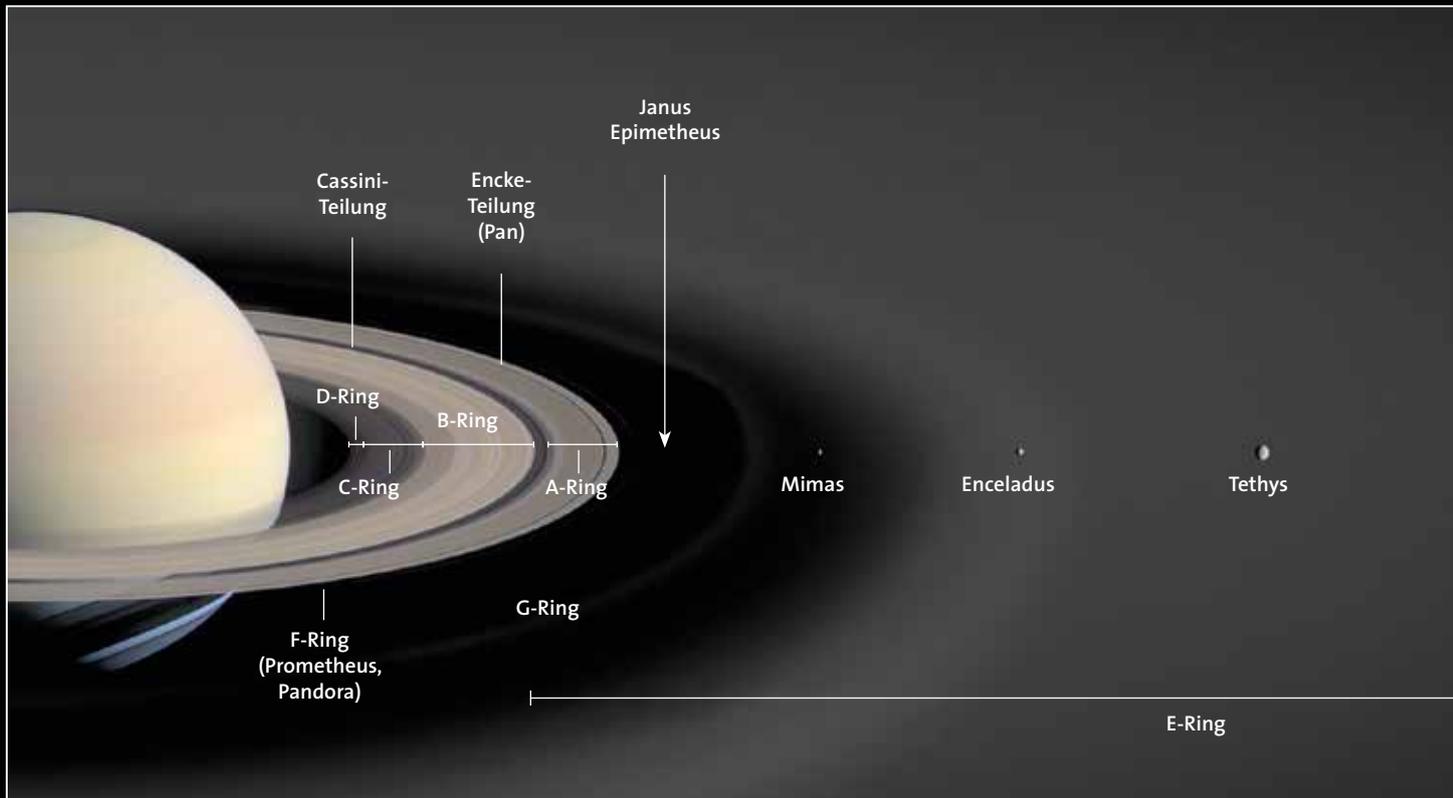
Ganz zum Schluss: Die enge Lücke zwischen D-Ring und Wolkenoberfläche

Das Ringsystem des Saturn wird von den vier Hauptringen A, B, C und D dominiert und setzt sich aus kleinen Eisteilchen zusammen. Sie sind schon in einem Amateuerteleskop gut zu erkennen. Die weiter außen befindlichen Ringe F, G und E sind äußerst dünn und bestehen aus feinsten Staubpartikeln.

Seit November 2016 umrundet Cassini Saturn auf Bahnen, deren saturnnächster Punkt knapp außerhalb des dünnen F-Rings liegt (graue Ellipsen; siehe Grafik rechts). Im südlichen Bereich ihrer Umläufe kann die Sonde Bedeckungen der Sonne durch die Ringe und den Planeten selbst verfolgen. Daraus lassen sich Informationen über den Aufbau der Ringe und die chemische Zusammensetzung

der Saturnatmosphäre in einer Qualität gewinnen, die in den zurückliegenden Missionsphasen nicht möglich war.

Durch einen dichten Vorbeiflug am Mond Titan (grüne Bahn) am 22. April 2017 wird der saturnnächste Punkt extrem nah an den Planeten verlegt (blaue Ellipsen). Bis zu ihrem Verglühen am 15. September wird die Raumsonde Cassini 22-mal zwischen der Innenkante des D-Rings und der Wolkenoberfläche des Gasriesen hindurchfliegen (blaue Kurven). Dabei kommt Cassini der Wolkenoberfläche des Saturn bis auf etwa 2000 Kilometer nahe, so dicht wie keine Raumsonde zuvor. Die orangefarbene Kurve gibt die Absturzbahn wieder, die am 12. September 2017 beginnt.



südliche Polarlicht, die Aurora, gut beobachten. Der saturnfernste Bahnpunkt, die Apoapsis, liegt bei 1,2 Millionen Kilometer oder rund dem dreifachen Abstand Erde–Mond. Damit ist er so weit von Saturn entfernt wie die Bahn des Mondes Titan. Ein Umlauf dauert jetzt nur noch sieben Tage – jede Woche eine neue Periapsispassage!

Zwanzig Mal wiederholt die Raumsonde diese Umläufe, bis am 22. April der 127. und letzte gezielte nahe Vorbeiflug an Titan, genannt T126, die Geschwindigkeit von Cassini relativ zu Saturn um rund 790 Meter pro Sekunde reduziert und somit die Bahn ein letztes Mal drastisch ändert. Mit »einem Satz« springt durch diese Passage die Periapsis von ihrer Lage knapp außerhalb der Hauptringe in eine neue

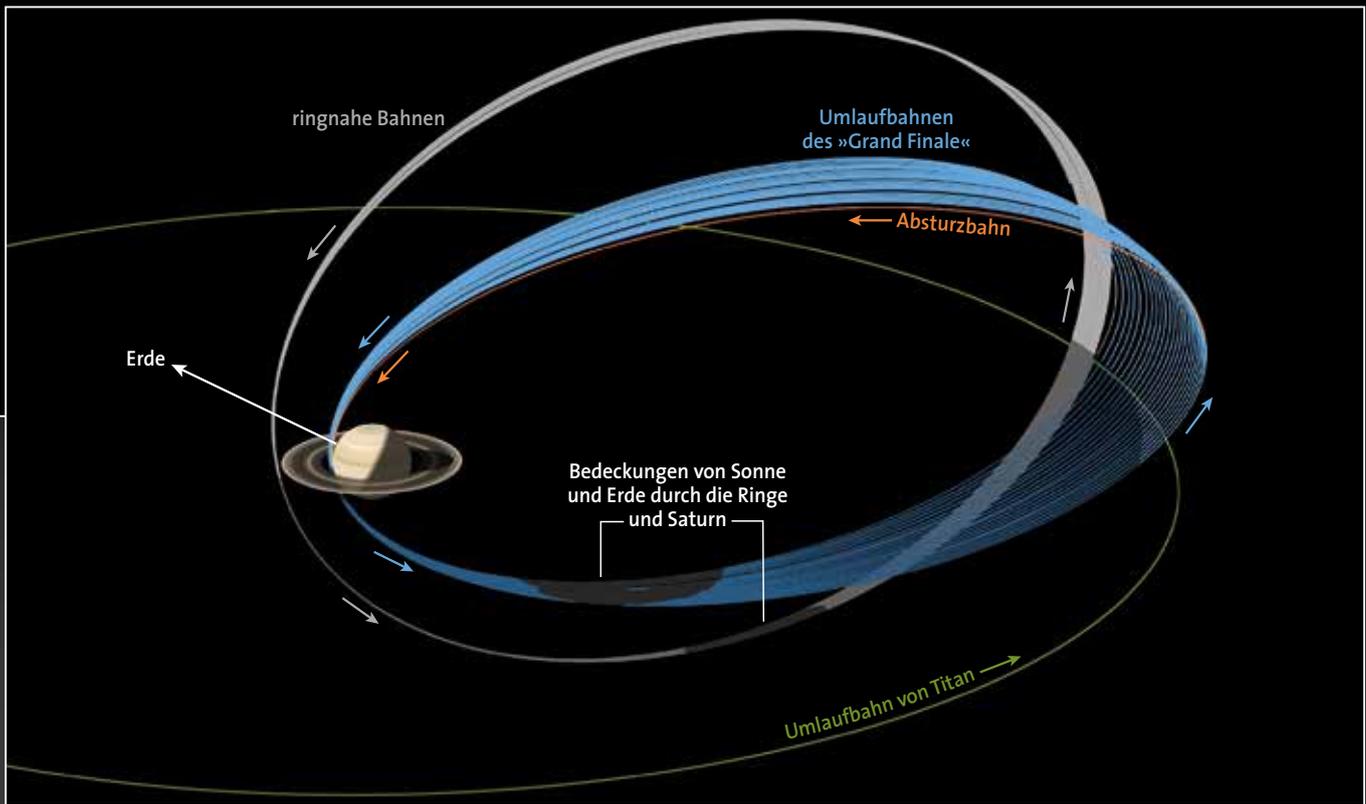
Position. Sie liegt dann in dem wenige tausend Kilometer breiten Korridor zwischen den inneren Bereichen des D-Rings und der Wolkenoberfläche des Planeten.

Cassini wird also zwischen den Hauptringen und dem Planeten hindurchfliegen – 22 derartige Umläufe sind geplant (siehe Grafik S. 33 oben). Die letzte Missionsphase ab November 2016 heißt »FRPOs« (F-Ring/Proximal Orbits), und die Phase mit den Durchflügen zwischen den Ringen und der Atmosphäre wird als »Cassini Grand Finale« bezeichnet.

Rätselhaftes Ringsystem

Diese völlig neue Bahngeometrie gestattet es, Daten zu sammeln, mit denen wissenschaftliche Fragestellungen beantwortet werden können, die bislang offenblei-

ben mussten. Darunter befinden sich so grundlegende Fragen wie diejenigen nach der Masse und dem Alter des Ringsystems. Die Saturnringe sind sehr ausgedehnt und dennoch sehr massearm. Ihre Fläche beträgt etwa 45 Milliarden Quadratmeter, was dem 60-Fachen der Erdoberfläche entspricht, der Durchmesser des Hauptrings liegt bei rund 273 000 Kilometer (oder etwa 70 Prozent der Strecke Erde–Mond). Das Volumen summiert sich hingegen lediglich auf etwa 1/250 des irdischen Volumens. Die Dicke der Ringe liegt an den meisten Stellen unter 100 Meter, oft auch unter 10 Meter. Somit lassen sie sich mit einem Blatt Papier von der Ausdehnung eines Fußballstadions vergleichen. In vielen Regionen leuchten sogar Sterne durch die Ringe hindurch.



NASA / JPL (Computergrafik) / SuW-Grafik



Diese Bahnen durchläuft die Raumsonde Cassini von November 2016 bis zum Verglühen am 15. September 2017.

Das Ringsystem von Saturn ist sehr ausgedehnt, und die äußeren Ringe überlappen sich mit den Bahnen einiger Monde.

Die Ringe bestehen aus kleinen Teilchen und Brocken, deren Größen zumeist zwischen denjenigen von Sandkörnern und Häusern liegen. Sie wachsen permanent durch beständiges, relativ sanftes Aneinanderstoßen im Minuten- bis Stundentakt, zerbrechen aber auch rasch wieder. Je näher man an die Ringe herankommt, desto komplexer erscheinen sie auf Grund der hochkomplizierten gravitativen Einflüsse der vielen kleinen Monde im Saturnsystem.

Den französischen Ringwissenschaftler André Brahic (1942–2016) veranlasste der Anblick der verwickelten Ringstrukturen einmal zu dieser charmanten Aussage: »Ringe sind wie das Parfüm einer Frau. Die Masse ist sehr gering, aber sie beinhalten eine Menge Informationen.«

Mit Hilfe von Schweremessungen soll Cassini die Masse des Ringsystems bis auf 0,03 Mimasmassen genau bestimmen. Mimas ist der innerste der größeren Eismonde; sein Durchmesser beträgt rund 400 Kilometer, seine Masse $3,8 \cdot 10^{19}$ Kilogramm oder ungefähr ein 160-tausendstel der Erdmasse. Die derzeitigen Schätzungen für die Saturnringe liegen zwischen 0,4 und 2,5 Mimasmassen, was Flächen-dichten von etwa 10 bis 50 Kilogramm pro Quadratmeter entspricht. Die Logik hinter der Massenbestimmung lautet: Ist die Masse eher groß, dann sind die Ringe alt, vielleicht sogar so alt wie Saturn selbst und wie das Sonnensystem. Ist sie hingegen klein, dann müssen die Ringe wegen der permanenten Erosion durch Mikrometeoroiden ein eher junges Phä-

nomen sein – vielleicht sogar jünger als 100 Millionen Jahre? Sämtliche derzeit diskutierten Theorien über die Entstehung und Entwicklung der Saturnringe sind auf diese Information angewiesen.

Wie lang ist der Saturntag?

Eine andere fundamentale, aber bislang nur ungenau bekannte Größe ist die Rotationsperiode des Saturn. Von der Raumsonde Voyager 1, die im November 1980 an Saturn vorbeiflog, stammt der Wert von 10 Stunden und 39,4 Minuten. Aus der Ferne gewonnene Daten von Cassini und anderen Raumsonden zeigten hingegen, dass die dieser Messung zugrunde liegende Radiostrahlung, die SKR (Saturnian Kilometric Radiation), wegen störender äußerer Einflüsse variable Werte zeigt. So-

Raumsonde Cassini: Daten und Fakten

Die Doppelmission Cassini-Huygens ist mit einer Startmasse von 5,7 Tonnen eine der massereichsten und am besten ausgestatteten Raumsonden in der Raumfahrtgeschichte und wurde daher auch schon scherzhaft als der »letzte Rolls-Royce« der Planetenforschung bezeichnet. Die Sonde ist mit zwölf Instrumenten zur Erkundung des Saturnsystems ausgerüstet, darunter Kameras, Spektrometer und Geräte zur Untersuchung von elektrischen und magnetischen Feldern sowie geladener Partikel. Die Energieversorgung basiert auf zwei Radioisotopengeneratoren, so dass Cassini ihre Energie nicht von der in Saturnentfernung sehr leuchtschwachen Sonne beziehen muss. Die Sonde startete am 15. Oktober 1997 von Cape Canaveral in Florida aus und benötigte mehr als sechseinhalb Jahre, um Saturn zu erreichen. Um überhaupt zum Ringplaneten zu gelangen, musste sie an den Planeten Venus, Erde und Jupiter vorbeifliegen, um genügend Schwung für den Weiterflug zu erhalten.

Der in den USA von der US-Raumfahrtbehörde NASA entwickelte Cassini-Orbiter erreichte Saturn am 1. Juli 2004 nach einer Flugstrecke von 3,5 Milliarden Kilometern und trat durch ein Schubmanöver des Bordantriebs in eine erste elliptische Umlaufbahn ein. Im Dezember 2004 wurde die von der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA entwickelte und gebaute Landesonde Huygens von Cassini abgetrennt. Sie setzte am 14. Januar 2005 als erstes von Menschenhand gefertigtes Objekt erfolgreich auf einem Mond des äußeren Sonnensystems auf, dem größten Saturnsatelliten Titan. Dieser verfügt als einziger Mond im Sonnensystem über eine dichte Atmosphäre.

Bis zum Missionsende am 15. September 2017 wird Cassini auf ständig wechselnden Bahnen Saturn 294-mal umrundet haben. Bis März 2017 flog die Sonde 160-mal die großen Monde an und übermittelte mehr als 370 000 Bilder vom Planeten selbst sowie seinen Monden und Ringen. Ursprünglich sollte Cassini Saturn vier Jahre lang umrunden, doch wegen des ausgesprochen guten technischen Zustands der Sonde wurde die Mission zweimal verlängert, zuletzt bis September 2017.

mit könnte die Rotationsperiode tatsächlich zwischen 10 Stunden 32 Minuten und 10 Stunden 47 Minuten betragen. Die SKR ist eine niederfrequente Radiostrahlung mit Wellenlängen von mehreren Kilometern. Messungen des Gravitationsfelds und der Magnetosphäre, darunter direkte Untersuchungen der Quellregion der SKR in hohen planetografischen Breiten, sollen hier Klarheit schaffen.

Weitere wissenschaftliche Fragestellungen betreffen den inneren Aufbau von Saturn. Sie sollen ebenfalls über ganz nah am Planeten ausgeführte Detailmessungen von Feldkomponenten des Gravitations- und Magnetfelds gelöst werden. Hier sei an die faszinierende These erinnert, dass tief im Inneren von Saturn möglicherweise Helium »ausregnet«. Zudem könnte es gelingen, die Größe des festen Kerns und die genaue Lage der Dynamo-region im Saturninneren, in der das Magnetfeld entsteht, zu ermitteln.

Des Weiteren wollen die Forscher die genaue Zusammensetzung der Atmosphäre und der Ringe bestimmen. Hierzu dienen die Instrumente zur Messung

von neutralen und geladenen Teilchen, das Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS), sowie der Cosmic Dust Analyzer (CDA) zur Analyse von kleinsten Staubpartikeln. Sie kommen nun erstmals in der Mission ganz nah an den Planeten heran. Die Partikel- und Felderinstrumente registrieren dabei die Wechselwirkungen zwischen dem magnetosphärischen Plasma und den Ringen. Der am Institut für Raumfahrtssysteme in Stuttgart gesteuerte Staubdetektor kann unter anderem Ringmaterie, die durch Meteoritentreffer herausgeschlagen wurde, direkt untersuchen. Mit Hilfe dieser Messungen soll auch der »Verschmutzungsgrad« der Ringpartikel untersucht werden, was ebenfalls Rückschlüsse auf das Alter der Ringe liefern kann.

Die detaillierten Strukturen von Magnetfeld, Strahlungsgürtel und Ionosphäre in unmittelbarer Nähe zur Wolkenoberfläche des Gasriesen sind ebenfalls bislang weitgehend unbekannt. So werden innerhalb des D-Rings die magnetischen Feldlinien nicht durch die riesige Barriere gestört, welche die Ringe für im Magnet-

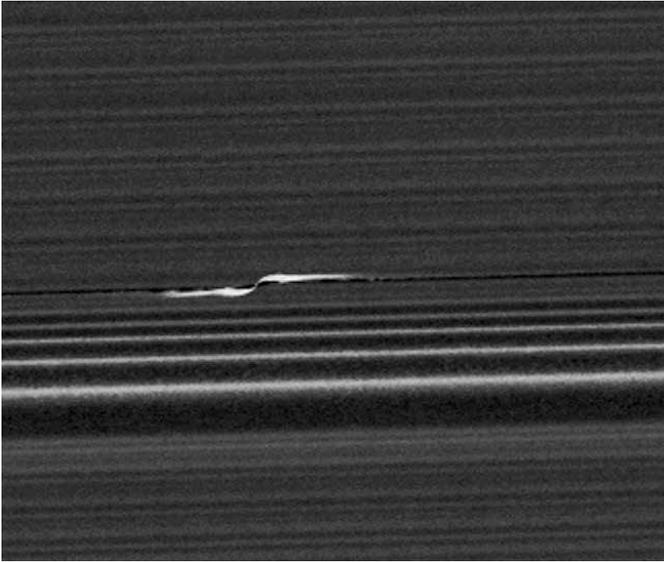
feld gefangene geladene Teilchen (Ionen) darstellen. Damit können hier Ionen gefangen bleiben und sich Strahlungsgürtel ausbilden. Diese lassen sich nun in den »Proximal Orbits« zum ersten Mal direkt untersuchen und charakterisieren.

Durch Bedeckungen von Sternen oder der Sonne sowie Radiowellenexperimente lässt sich die Feinstruktur des Ringsystems mit einer bislang nicht erreichbaren Genauigkeit von wenigen Metern enthüllen. Hierfür zeichnen die Spektrometer die schnellen Helligkeitsänderungen eines Sterns auf, der aus der Sicht der Sonde hinter den Ringen vorbeizieht. Außerdem werden Radiosignale analysiert, die Cassini direkt durch die Ringe hindurch zur Erde sendet.

Welche Beobachtungen sind zum Abschluss der Cassini-Mission im Detail geplant? Eine Tabelle, die Einzelheiten der Periapsisdurchflüge wie zum Beispiel Orbitnummer, Datum, minimale Saturndistanz und primäre Aktivitäten auflistet, ist online abrufbar (siehe Weblink am Ende dieses Beitrags). So sind beispielsweise die detailreichsten Aufnahmen der Ringe für fünf Periapsen zwischen Mitte Dezember 2016 und Anfang Juni 2017 vorgesehen. Mehrfach soll der gesamte Hauptring mit einem radialen Scan erfasst werden; die räumliche Auflösung der Telekamera liegt dabei unter einem Kilometer pro Bildpunkt (Pixel). Mitte April soll Cassini das gesamte Ringsystem mit der Weitwinkelkamera in einem 60 Aufnahmen umfassenden Bildmosaik fotografieren. Dabei befindet sich die Sonne hinter Saturn, so dass Cassini die Ringe im Gegenlicht untersuchen kann.

Minimonde und Propeller

Andere Beobachtungen gelten einem Phänomen, das in Aufnahmen von Cassini entdeckt wurde und als Propeller bezeichnet wird. Dies sind Störungen im A-Ring, welche durch die Gravitation von dort befindlichen kleinen Minimonden verursacht werden. Sie ähneln auf den Bildern klassischen Zweiblatt-Flugzeugpropellern (siehe Bild S. 35 oben). Die Kleinstmonde sind weniger als einen Kilometer groß und ließen sich bislang nicht direkt, sondern nur über ihre gravitative Wirkung auf die Ringpartikel beobachten. Objekte mit inoffiziellen, jedoch passenden Namen wie Santos Dumont, Earhart und Blériot sollen zum Beispiel während der F-Ring-Orbits anvisiert werden. Dassel-



Propeller im A-Ring

Diese helle »Propeller«-Struktur im A-Ring des Saturn wird durch einen wenige Hundert Meter großen Minimond verursacht, der hier nicht sichtbar ist. Die Schwerkraft des Mondes stört die Bewegung der Ringpartikel im unmittelbaren Umfeld. Das Bild entstand Ende Februar 2017 aus rund 100 000 Kilometer Abstand.

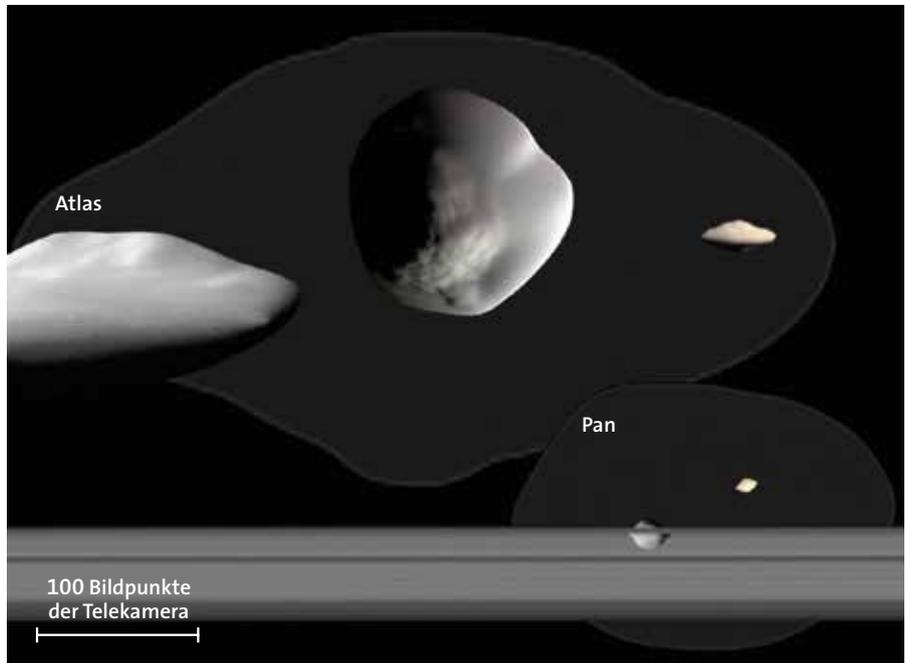
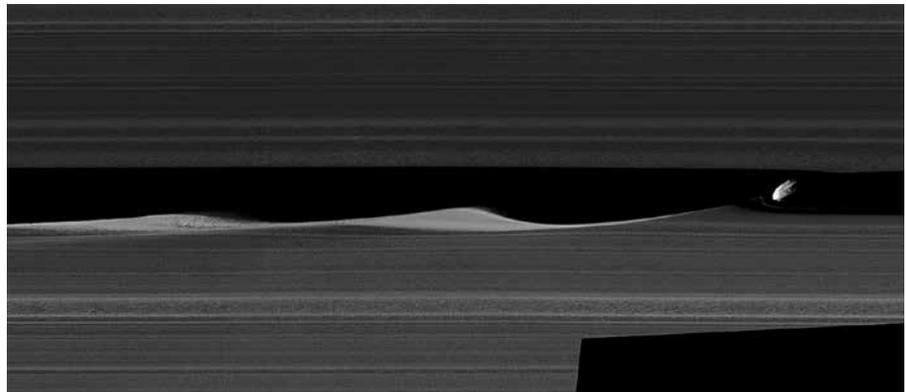
Kleiner Mond, große Wirkung

Der nur rund acht Kilometer große Mond Daphnis, der Saturn in der schmalen Keeler-Lücke im A-Ring umrundet, lenkt durch seine Schwerkraft die Ringpartikel an den Rändern der Lücke in horizontaler und vertikaler Richtung von ihren Bahnen ab. Dadurch entstehen die auffälligen Wellenmuster.

be gilt auch für eine auf Cassini-Bildern von 2013 entdeckte Struktur am unmittelbaren Rand des A-Rings, bei der es sich vielleicht um einen gegenwärtig neu entstehenden Minimond handelt und die informell »Peggy« getauft wurde. Von den Ringmonden Daphnis, Pan und Atlas wird es die schärfsten Aufnahmen der Mission geben. Der rund acht Kilometer große Daphnis kreist in der schmalen Keeler-Lücke nahe der Außenkante des A-Rings. Die Aufnahmen von Mitte Januar 2017 zeigen viele Details dieses Objekts und seine Wirkung auf den Ring (siehe Bild rechts).

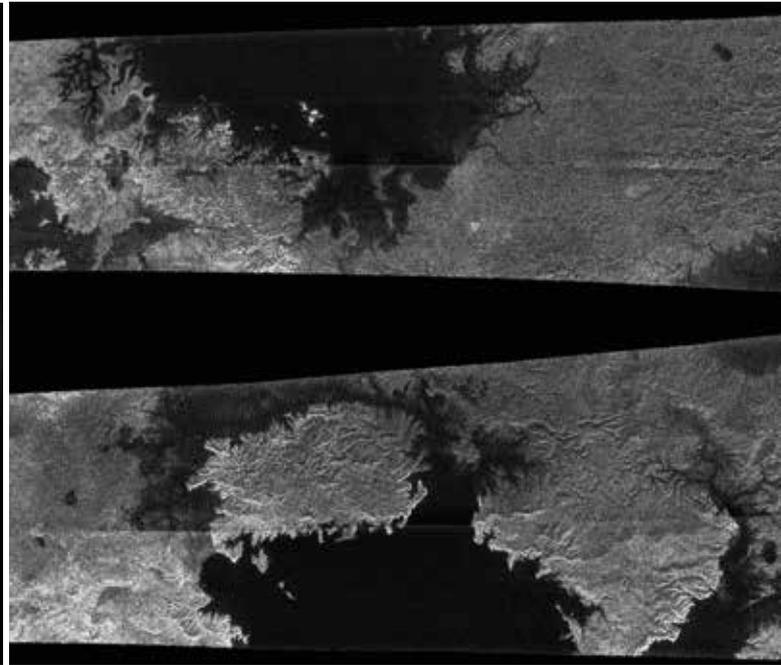
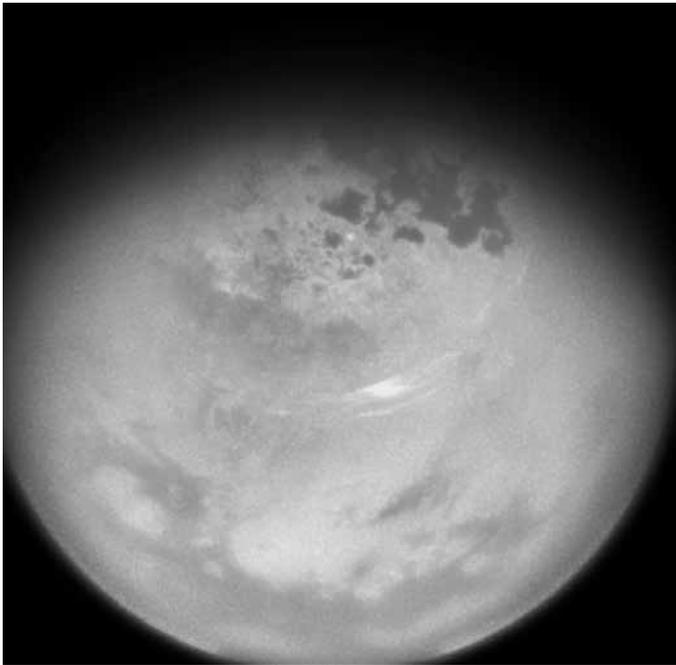
Der knapp 30 Kilometer große Mond Pan umrundet Saturn in der Encke-Teilung. Er wurde am 7. März mit einer Auflösung von weniger als 200 Metern pro Bildpunkt aufgenommen. (Da dieser Artikel bereits vorher in Druck gegangen ist, sei für das aktuelle Bild auf die Website saturn.jpl.nasa.gov verwiesen.) Atlas, der knapp außerhalb des A-Rings kreist, noch ein wenig größer ist als Pan und in seinem Aussehen an eine fliegende Untertasse erinnert, wird schließlich Mitte April in nur 12 000 Kilometer Distanz passiert (siehe Bild rechts). Vielleicht werden diese Bilder zu den spektakulärsten der gesamten Cassini-Mission gehören?

Auch einige andere Monde wird Cassini noch gelegentlich anvisieren, wenn auch meist aus großer Distanz. Der Mond Enceladus soll während der FRPOs 13-mal im Gegenlicht beobachtet werden. Dabei dokumentiert die Sonde die eruptive Aktivität in Abhängigkeit von der Position dieses Mondes auf seiner Umlaufbahn. Bei weiteren Beobachtungen wird ein Infrarotspektrometer die zeitlichen Änderungen der thermalen Signaturen der Südpol-



Minimonde Atlas und Pan

Im März und April 2017 fotografiert die Raumsonde Cassini die kleinen Monde Pan und Atlas aus relativ geringen Abständen. Einige der bislang besten Bilder der beiden Trabanten sind in dieser Montage zusammengestellt. Die grauen Umriss im Hintergrund geben die Größe der zu erwartenden Bilder wieder. Pan hat einen maximalen Durchmesser von rund 34 Kilometern, Atlas von etwa 40 Kilometern.



region von der die vulkanische Aktivität ausgeht, überwachen.

Weitere Beobachtungen der Eismonde umfassen Aufnahmen von Tethys, Mimas, Rhea, Iapetus und Pandora aus größerer Entfernung sowie zwei relativ nahe Passagen an Epimetheus. Ein Vorbeiflug an Janus kann leider nicht genutzt werden, weil dieser zeitgleich mit der Passage des Mondes Atlas stattfindet und die Wissenschaftler diesem Trabanten eine höhere Priorität eingeräumt haben. Der große Mond Titan wird auch regelmäßig beobachtet, um das Wetter und mögliche Veränderungen auf der Oberfläche zu dokumentieren.

Schließlich sind auch noch Beobachtungen der äußeren oder irregulären

Monde vorgesehen. Von diesen Objekten sind mit irdischen Teleskopen bislang 38 entdeckt worden; damit sind sie sogar zahlreicher als die 24 bekannten »regulären« oder inneren Monde. Sie umrunden den Ringplaneten auf sehr weiten und stark elliptischen Bahnen und sind bis auf Phoebe alle kleiner als 40 Kilometer im Durchmesser. Die finalen Cassini-Aufnahmen erfolgen aus Abständen zwischen 8 und 25 Millionen Kilometer und zeigen die Monde nur als Lichtpunkte.

Der Anfang vom Ende

Der Titanvorbeiflug T126 am 22. April läutet dann das »Grand Finale« ein. Er führt nicht nur zum Überspringen der Ringe

und verändert somit die Lage des saturn-nächsten Punkts erheblich, sondern bietet auch eine hervorragende Gelegenheit, ein letztes Mal die großen Methanseen hoch im Norden des Monds zu erkunden. Bei diesem nahen Überflug wird über einen Zeitraum von zwölf Stunden zum 53. und letzten Mal das hochauflösende Radarinstrument bei Titan zum Einsatz gebracht. Vielleicht gelingt es dabei, die Tiefen und die chemischen Zusammensetzungen auch von den kleineren Methanseen zu ermitteln?

Einzigartig in der Mission sind Radarabtastungen der Ringe. Die Daten dürften Details von nur wenigen Kilometern Durchmesser enthüllen, in einigen Berei-

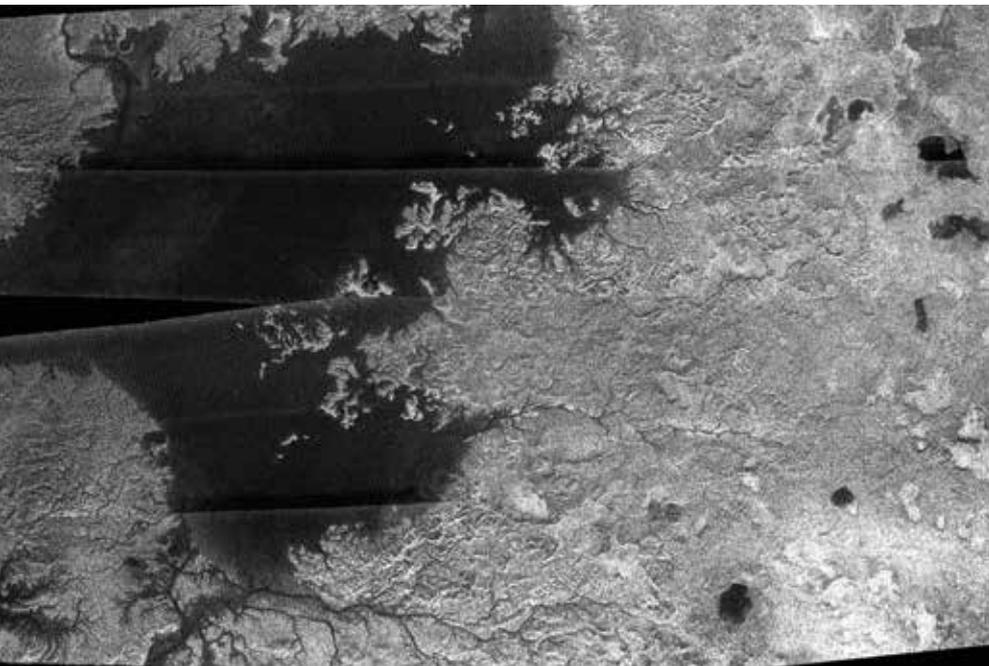
Kontraste menschlichen Strebens

Nicht nur bei meinen Dienstreisen zu den Projektmeetings am Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA in Pasadena, nördlich von Los Angeles in Kalifornien gelegen, stellte ich mir gelegentlich Fragen wie diese: Was mache ich da eigentlich genau? Wofür ist das nützlich, gut, wichtig? Wer möchte das – außer mir selbst, den Fachkollegen und den SuW-Lesern? Warum ist es richtig, dass so etwas wie interplanetare Raumfahrt gemacht wird? Wie viele Menschen inspiriert oder kümmert das überhaupt?

Beim Anblick gewisser Straßenschilder (siehe Bilder rechts) zeigten sich Alternativen auf: Mein Ziel war Pasadena – doch muss ich leicht zerknirscht eingestehen, dass viel mehr Menschen lediglich Hollywood ein Begriff ist. Mein Ziel war das JPL – ich bog tatsächlich jedes Mal nach links ab – doch wie viel Prozent der Menschen würden lieber nach rechts abbiegen, zum Rose Bowl Stadium? (Hat die unterschiedliche Größe der Schilder da schon eine Bedeutung?) An allen drei Orten erfüllen sich Träume, wenn

auch von extrem unterschiedlicher Art und unter sehr verschiedenen Voraussetzungen. Im Rose Bowl toben die Emotionen – man fiebert mit einem Team oder einfach allgemein mit. Das üblicherweise eher enge Korsett der individuellen Impulskontrolle darf gelockert werden, und die menschliche Natur reicht aus, dass daraus ein gigantisches Geschäft entsteht. Durch Hollywood werden Illusionen und Träume lebendig. Nicht von ungefähr wird diese Industrie als »Traumfabrik« bezeichnet.

Und am JPL? Auch hier werden Träume verwirklicht, allerdings auf völlig andere Weise und weit entfernt vom »naturbedingten, gigantischen Geschäft«. Die Träume, die hier realisiert werden, liefern zumeist bescheidenere Emotionen in einer ganz anderen Taktrate, dafür »nur« – oder immerhin? – Daten und Fakten, die real sind, welche die Wirklichkeit abbilden, die unser aller Weltbild erweitern (können). Zu den Tätigkeiten an allen drei Orten – organisierter, friedlicher Wettkampf; Illusionen schaffen; den bewussten Horizont



Titan im Methanlicht und Radar

Auf dem größten Saturnmond Titan entdeckte die Raumsonde Cassini große Seen aus Methan. Das Bild ganz links nahm die Telekamera im Infraroten auf; hier ist die im sichtbaren Licht undurchdringliche Dunstschicht etwas transparent. Das Bild links entstand mit dem Radarsystem der Raumsonde und enthüllt die überraschend erdähnlichen Küstenlandschaften auf Titan. Im April 2017 erkundet Cassini die Seen auf Titan letztmals mit Radar.

chen sogar Strukturen kleiner als ein Kilometer. Wie die Ringe bei einer Wellenlänge von 2,2 Zentimetern aussehen, ist bislang völlig unbekannt. Auch die Saturnatmosphäre wird kurz vor Missionsende mit dem Radar untersucht werden.

Ab Ende April sind zudem mit der Telekamera die schärfsten Bilder der Atmosphäre während der gesamten Mission geplant. Ende Juni soll die Weitwinkelkamera einen Bildstreifen der Wolkenoberfläche aufnehmen, der vom Nordpol über den Äquator bis zum Südpol reicht.

Auf Dione, dem viertgrößten Saturnmond, wird mit Hilfe von Gegenlichtaufnahmen nach möglichen Gasaustritten gesucht. In den Daten des Magnetometers

finden sich Hinweise, dass nicht nur Enceladus, sondern auch Dione Materie an die Umgebung abgibt – allerdings um einen Faktor 100 bis 1000 weniger. Da unklar ist, wo genau auf diesem Mond Eruptionsfontänen zu suchen wären und wie hoch sie in den Raum hinausreichen könnten, ist allerdings die Hoffnung, tatsächlich welche zu finden, nicht sehr groß.

Für den 20. August und für die Nacht vom 8. auf den 9. September stehen die vielleicht ungewöhnlichsten Aufnahmen auf dem Plan: Während Cassini am Saturn »entlangschrammt«, blicken die Kameras nach außen, und ein kleiner Ausschnitt der Ringe kann aus der »Inside-out-Perspektive« aufgenommen werden. Wie

spektakulär diese Bilder letztlich sein werden, bleibt abzuwarten. Dennoch ist aber allein die Möglichkeit, nicht wie seit Jahrhunderten von außen, sondern einmal von innen, von Saturn aus, die Ringe zu betrachten, so neuartig, dass diese Bilder unabhängig von ihrer tatsächlichen Qualität mit Sicherheit große Beachtung finden werden.

Derzeit sind bei der Projektleitung am JPL Überlegungen im Gange, Cassini bei den letzten zwei Umläufen vor dem Atmosphäreneintritt noch deutlich näher an die Wolkenoberfläche des Planeten heranzuführen. Die Entscheidung darüber wird letztlich davon abhängen, wie dicht die Saturnatmosphäre in unmittelbarer Nähe zum Planeten wirklich ist. Sollte sie ausreichend dünn sein, so dass die Lageregelungstriebwerke der Sonde ein eventuelles Taumeln durch die Reibung an den Gasen der Hochatmosphäre verhindern können, fliegt Cassini bis auf weniger als 2000 Kilometer an die Wolken heran. Ist sie dagegen dichter als erwartet, wird Cassinis Bahn für die letzten Umläufe noch ein wenig angehoben.

Impakt!

Während der 294. Umrundung wird dann um 7:45 Uhr MESZ am 12. September 2017 die letzte halbe Runde um Saturn eingeläutet, welche die Cassini-Sonde nicht überleben wird. Sie beginnt mit Routinebeobachtungen von Titan, danach werden diese Daten zur Erde übermittelt. Am frühen Nachmittag des 13. September folgt schließlich das letzte Orbitsegment der



Tilmann Denk

erweitern – sind auf der Erde einzig die Menschen in der Lage. Wir nennen dies Kultur – ist es das, was das Menschsein letztlich in seiner Tiefe ausmacht? Ich denke zu einem erheblichen Teil ja. Für das langfristige Überleben unter zivilisierten Bedingungen dürfte aber vor allem der dritte Aspekt – bewusste Horizonterweiterung – entscheidend werden. TILMANN DENK

Mission; es wurde von der Magnetosphären-Forschergruppe geplant.

Begonnen wird mit einer Beobachtung von Saturn, die »Farewell« getauft wurde. Cassini fotografiert den Planeten und seine Ringe zum allerletzten Mal; aus einer Entfernung von etwa 1,1 Millionen Kilometern füllen die Ringe einen Bereich von etwa 15 Grad am Himmel von Cassini aus und passen gemeinsam mit Saturn in ein 2×6-Aufnahmen umfassendes Mosaik der Weitwinkelkamera (siehe Grafik S. 39).

Am späteren Nachmittag ist Enceladus, der aus Sicht von Cassini hinter der Nordpolregion von Saturn verschwindet, an der Reihe. Diese Aufnahmen nehmen symbolisch das Verschwinden der Raumsonde am übernächsten Tag vorweg. Danach folgen letzte Routinebeobachtungen von Titan und vom Polarlicht. Diese Auroramessungen nehmen nochmals fast einen ganzen Tag in Anspruch; die Beobachtungen werden einmal jedoch 40 Minuten lang für letzte Bilder der Struktur »Peggy« am Rand des A-Rings unterbrochen.

Anschließend fotografieren die Kamearas zum letzten Mal die Propellerstrukturen im A-Ring. Etwa zwei Stunden sind dafür vorgesehen, und das allerletzte Foto von Cassini wird dann am 14. Sep-

tember gegen 21:30 Uhr MESZ geschossen werden. Danach richtet die Sonde die Hauptantenne zur Erde und beginnt mit der finalen Datenübertragung, zunächst zur Empfangsstation Goldstone in der Mojave-Wüste in Kalifornien, später nach Tidbinbilla südwestlich von Canberra in Australien. Bis zum Verlust des Funksignals (loss of signal, LOS) sind es noch etwa 14 Stunden und 22 Minuten.

Am Freitag, dem 15. September 2017, um 09:14 Uhr MESZ Bordzeit dreht sich Cassini ein letztes Mal ein wenig um die Längsachse, damit die Felder- und Partikelinstrumente besser in Flugrichtung ausgerichtet sind; die Hauptantenne weist weiterhin präzise zur Erde. Bis zum LOS sind es jetzt noch etwa dreieinhalb Stunden; die Distanz zum Planeten beträgt noch mehr als 90 000 Kilometer und die rapide zunehmende Geschwindigkeit relativ zu Saturn bereits 21 Kilometer pro Sekunde. Alle ab jetzt aufgezeichneten Daten werden nun annähernd in Echtzeit nach Canberra gesendet. Während der letzten Missionsminuten wird Cassini näher als je zuvor an Saturn dran sein, und ihre Geschwindigkeit steigt auf 35 Kilometer pro Sekunde an.

Gegen 12:44 Uhr MESZ – die genaue Zeit hängt von der tatsächlichen Flugbahn der

Sonde und den Druckverhältnissen in der Saturnatmosphäre ab und kann erheblich abweichen – wird Cassini nicht mehr in der Lage sein, die Antenne auf die Erde ausgerichtet zu halten, und verstummt für immer. Kurze Zeit später verglüht die Sonde als große Sternschnuppe in der Saturnatmosphäre und wird auf molekularer Ebene zu einem Bestandteil des Planeten. Wegen der Distanz zwischen Saturn und Erde von 83,5 Lichtminuten oder 1,5 Milliarden Kilometern erreicht uns das letzte Signal voraussichtlich kurz nach 14 Uhr MESZ. Formal wird noch bis 16:15 Uhr MESZ gelauscht. Dann ist die Cassini-Mission aus und vorbei.

Der eine oder andere Leser mag sich fragen, ob dieses Ende vielleicht noch verhindert und die Mission fortgesetzt werden könnte. Die Antwort ist ein klares »leider nein!« Die Cassini-Mission wird nicht weiter verlängert. Cassini wird den Saturn nicht verfehlen, und die Sonde wird nicht überraschend auch diesen Periapsisdurchflug überstehen.

Was die Betriebsstoffe und Ressourcen betrifft, wäre es zwar möglich, Cassini über 2017 hinaus weiter zu betreiben, allerdings war das zu dem Zeitpunkt, als die zweite Missionsverlängerung geplant wurde, noch nicht absehbar. Noch wesent-



STERNE UND WELTRAUM JAHRGANGS- CD-ROM 2016

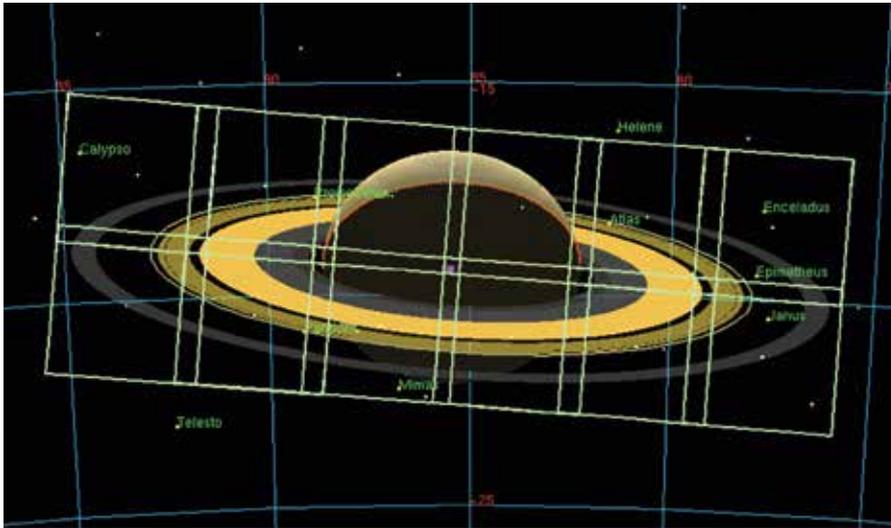
Auf der CD-ROM von **Sterne und Weltraum** finden Sie den kompletten Jahrgang mit sämtlichen Bildern sowie alle Jahreshaltsverzeichnisse von 1962 bis 2016. Die Auflösung der Bilder ist doppelt so hoch wie in den monatlichen PDF-Dateien. Der zum Lesen erforderliche Acrobat Reader ist enthalten.

Die SuW-CD-ROM 2016 kostet als Einzelbestellung € 25,- (zzgl. Porto); als Standing Order zur Fortsetzung € 22,50 (inkl. Porto Inland). Alle Preise verstehen sich inkl. Mehrwertsteuer.

Alternativ gibt es den Jahrgang erstmalig auch als Download für € 22,50.

Erscheinungstermin im April 2017

Telefon: 06221 9126-743
service@spektrum.de
www.spektrum.de/sammeln



Die letzte Großaufnahme

Zwei Tage vor dem Verglühen in der Saturnatmosphäre am 15. September 2017 nimmt die Raumsonde Cassini ein letztes vollständiges Porträt des Ringplaneten mit ihrer Weitwinkelkamera auf; dazu werden zwölf Einzelbilder benötigt. Während die Sonde auf die beleuchtete Seite der Ringe blickt, wird Saturn als Sichel zu sehen sein.

licher war damals jedoch, dass ein »garantiertes« Missionsende geplant werden musste, bei dem Cassini definitiv nicht mit den Monden Enceladus oder Titan kollidiert. Eine Planetenschutz-Richtlinie der NASA besagt nämlich, dass nicht sterilisierte Raumsonden auf keinen Fall auf Himmelskörpern abstürzen dürfen, bei denen es eine Biosphäre geben könnte. Ansonsten bestünde die Gefahr, diese Welten mit irdischen Mikroben zu verseuchen. Das Ende der Mission steht also schon seit vielen Jahren fest.

Das Vermächtnis von Cassini

Was nach dem Absturz noch für rund ein Jahr weiterbestehen wird, ist die Finanzierung. Insbesondere die Projektleitung muss die Aufgabe vollenden, die Mission so in ihren Einzelheiten zu dokumentieren, dass spätere Generationen von Raumsondenbauern, -steuerleuten und -nutzern von den zahllosen Erfahrungen profitieren können. Auch für Historiker werden diese Aufzeichnungen von großem Nutzen sein. Unsere Finanzierung an der Freien Universität Berlin, wo wir durch die Raumfahrtagentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert werden, dauert ebenfalls noch bis Herbst 2018. Diese Zeit wird für die Datenauswertung dringend benötigt.

Was bleiben wird, sind die Daten, das neue Wissen und die neuen Perspektiven,

die Cassini vom Saturnsystem gebracht hat, sowie die Erinnerungen und Erlebnisse. Mit der Entdeckung von so fremdartigen Gebilden wie mit flüssigem Methan gefüllten Seen auf Titan hatten die Planetenforscher immerhin zu Beginn der Mission gerechnet. Wer aber hätte damals vermutet, dass es unter der Oberfläche des nur 500 Kilometer großen Mondes Enceladus einen Ozean mit Hydrothermalquellen an seinem Grund geben könnte und dass sich dieser Mond zum heißen Kandidaten für ein mögliches Refugium außerirdischen Lebens mausern würde?

Für mich wäre es noch spannend zu erfahren, für wie viele SuW-Leser die Cassini-Mission »schon immer« gegenwärtig und aktiv war. Ich möchte vermuten, dass sich bei zahlreichen Lesern das Interesse für die Astronomie erst nach dem Start der Sonde vor 20 Jahren entwickelt hat. Vielleicht wurden ja einige sogar direkt durch die Mission Cassini-Huygens zu diesem erhabenen Hobby inspiriert?

Doch auch wenn Cassini »ewig« zu existieren scheint und die Menschen, die zum Zeitpunkt des Starts gerade geboren waren, inzwischen erwachsen sind, wird diese Mission bald Geschichte sein. Das Erbe dieses wissenschaftlichen und technischen Abenteuers bereichert den Teil der Menschheit, für den ein Interesse jenseits des eigenen Tellerrands einen echten, einen humanen Wert darstellt. ©



TILMANN DENK arbeitet an der Freien Universität Berlin. Im Rahmen der Mission der Raumsonde Cassini ist er unter anderem für die Kamera-Beobachtungsplanung der Saturnmonde verantwortlich.

Seine Forschungen konzentrieren sich zurzeit auf die zahlreichen äußeren Monde des Planeten.

Literaturhinweise

Althaus, T.: Cassini-Huygens – Die Erforschung des Saturnsystems. In: *Sterne und Weltraum* 10/1997, S. 838–847

Althaus, T.: Botschaften aus einer fernen Welt – Landung von Huygens auf Titan ein voller Erfolg. In: *Sterne und Weltraum* 3/2005, S. 22–27

Althaus, T.: Auf Tuchfühlung mit Titan. In: *Sterne und Weltraum* 9/2007, S. 32–35

Denk, T.: Die Raumsonde Cassini erreicht Saturn, Teil 1: Die langjährige Erforschung des Planeten, seiner Ringe und Monde beginnt. In: *Sterne und Weltraum* 6/2004, S. 44–51

Denk, T.: Die Raumsonde Cassini erreicht Saturn, Teil 2: Der Eintritt in die Umlaufbahn. In: *Sterne und Weltraum* 7/2004, S. 36–44

Denk, T.: Huygens landet auf Titan – Die Erforschung der Saturnmonde beginnt. In: *Sterne und Weltraum* 1/2005, S. 22–31

Denk, T.: 2005 – Das Jahr der Saturnmonde. Die Erkundung des Saturnsystems durch Cassini geht ins zweite Jahr. In: *Sterne und Weltraum* 8/2005, S. 22–29

Denk, T.: Cassini besucht Iapetus. In: *Sterne und Weltraum* 9/2007, S. 18–20

Denk, T.: Cassini at Iapetus: A Bumpy but Successful Flyby. In: *The Planetary Report XXVIII*, S. 10–16, 2008

Denk, T.: Das Iapetus-Rätsel ist gelöst – Wie ein Saturnmond schwarz-weiß wurde. In: *Sterne und Weltraum* 4/2010, S. 40–49

Postberg, F., Dambeck, T.: Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus. In: *Spektrum der Wissenschaft* 6/2015, S. 32–41

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1439098



Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1285844 und www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051356