



Von Gerhard Neukum und dem DLR-Galileo-Team

GALILEO's „Jupiter-Orbit-Tour“

Mit dem Vorbeiflug der Raumsonde Cassini zum Jahreswechsel 2000/2001 trat die Erforschung des Riesenplaneten Jupiter wieder verstärkt in das öffentliche Bewusstsein. Während Cassini aber „nur“ an Jupiter vorbeiflog, umkreist die Sonde Galileo bereits seit über fünf Jahren den größten aller Planeten unseres Sonnensystems. In diesen fünf Jahren gelangen 29 Umrundungen mit ebenso vielen gezielten Vorbeiflügen an den vier großen Jupitermonden Io, Europa, Ganymed und Callisto, die nach ihrem Entdecker Galileo Galilei auch als Galileische Monde bezeichnet werden.







Galileo (die Sonde) sendete zahlreiche Bilder und Daten zur Erde, und unser heutiges Bild von Jupiter und seinen Monden wurde sehr wesentlich von dieser Mission geprägt. Während die beiden Sonden Voyager 1 und 2 im Jahr 1979 die Jupitermonde von „bloßen Pünktchen“ in Teleskopen zu „richtigen Welten“ machten, haben wir erst durch Galileo Strukturen und Prozesse auf deren Oberflächen im Grundsatz verstanden.

Jupiter besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium und ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 Kilometer und einem Poldurchmesser von 133.700 Kilometer der größte Planet im Sonnensystem. Im Vergleich dazu ist unsere Erde mit einem Durchmesser von 12.756 Kilometer eher klein. Anders als bei unserem Heimatplaneten blickt man bei Jupiter von außen aber nicht auf eine feste Oberfläche, sondern auf eine fast geschlossene Wolkendecke in einer riesigen Atmosphäre, die viele Zehntausend Kilometer ins Innere des Planeten hineinreicht. Daher wird Jupiter oft auch als Gasplanet bezeichnet. Mindestens 28 Monde begleiten ihn auf seiner Bahn um die Sonne. Allein elf davon wurden erst im letzten Jahr neu entdeckt, und ein 1975 beobachteter und wieder verloren gegangener Mond konnte ebenfalls im letzten Jahr wieder aufgefunden werden.

Die vier größten Jupitermonde, die Galileischen Monde, wurden als erste Monde eines Planeten überhaupt im Januar 1610 entdeckt und gehören gemeinsam mit unserem Erdmond und dem Saturnmond Titan zu den sechs größten Monden im Sonnensystem. Ihre Durchmesser liegen zwischen 3.100 und 5.300 Kilometer; sie sind damit kleiner als die Erde, aber zum Teil so groß wie der Planet Merkur. Ihre Abstände zur Jupiterwolkenoberfläche liegen zwischen etwa 350.000 und 1,8 Mio. Kilometer. Die Oberflächen von Europa, Ganymed und Callisto werden von Wassereis dominiert, und es wird über

Abb. vorherige Seite: Galileo verlässt die Erde. An Bord der US-Raumfähre Atlantis begann am 18. Oktober 1989 die lange Reise Galileos, welche die Sonde bis heute drei Mal um die Sonne und 30 Mal um Jupiter herumgeführt hat.

Abb.: Der Jupiter in seiner ganzen Schönheit.

Ozeane aus flüssigem Wasser unter ihren Oberflächen spekuliert. Io hingegen weist eine silikatische Kruste mit großem Anteil an Schwefel und Schwefeldioxid auf und ist der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem.

Die anderen Monde sind klein, ihre Durchmesser reichen von 200 Kilometer bis herab zu wenigen Kilometern. Vier kleine Monde (Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe) kreisen noch innerhalb der Io-Bahn und sind für die Entstehung und Erhaltung eines dünnen Staubs um Jupiter verantwortlich. Aufgrund ihrer Nähe zu Jupiter und dessen großer Masse besitzen sie enorme Bahngeschwindigkeiten; so rast der innerste Mond Metis mit 113.000 km/h innerhalb von nur sieben Stunden um den Planeten. Auf der Erde würde man bei so einem Tempo eine Weltreise in 21 Minuten schaffen. Außerhalb der Galileischen Monde, in etwa elf Mio. Kilometer Distanz zum Planeten, kreisen die fünf Monde Himalia, Elara, Lysithea, Leda und S/2000 J 11. Etwas näher an Jupiter (in 7,4 Mio. Kilometer Abstand) befindet sich noch S/1975 S 1, der bereits erwähnte verlorene und „wieder gefundene“ Mond. Weit draußen schließlich, in etwa 20 bis 25 Mio. Kilometer Abstand, kreisen mindestens 14 kleine Monde um Jupiter, die vermutlich eingefangene Asteroiden oder Kometen sind: Ananke, Carme, Pasiphae, Sinope sowie die neu entdeckten S/1999 J 1 und S/2000 J 2 bis J 10. Ihre Bahnen verlaufen retrograd, d.h. entgegen dem im Sonnensystem üblichen Umlaufsinn. Die äußeren Jupitermonde konnten bislang nur von der Erde aus als kleine Pünktchen in großen Teleskopen beobachtet werden. Erst Cassini näherte sich dem größten der äußeren Monde, Himalia, am 18. Dezember 2000 bis auf 4,4 Mio. Kilometer und konnte diesen Mond als (wenn auch kleines) Scheibchen aufnehmen. Die Galileo-Sonde gelangte nur in die Nähe der Galileischen Monde sowie der kleinen inneren Monde, alle anderen waren zu weit weg.

Galileo-Sonde

Die Raumsonde Galileo ist eine unbemannte Sonde mit dem Ziel der Erforschung des Jupiters, seines Magnetfeldes und seiner Monde. Sie bestand ursprünglich aus zwei Komponenten. Der Orbiter ist 6,15 Meter hoch und wog beim Verlassen der Erdumlaufbahn 2.223 Kilogramm; 925 Kilogramm davon entfielen

auf den Treibstoff für Bahn- und Lageregelungssysteme. Insgesamt elf wissenschaftliche Instrumente sind an Bord, das wichtigste davon ist das Kameraexperiment, an dem auch das DLR über die Imaging-Team-Mitgliedschaft des Autors beteiligt ist. Der andere Teil ist die sogenannte Atmosphären-Eintauchsonde oder „Probe“. Bei einem Durchmesser von 125 Zentimeter hatte sie eine Masse von 339 Kilogramm und war für einen Höllenritt durch die Jupiteratmosphäre konzipiert. Sieben wissenschaftliche Experimente an Bord der Probe lieferten „In-situ-Daten“ aus dem Bauch des Riesen.

Die Kamera des Galileo-Orbiters, auch Solid-State Imaging (SSI) Experiment genannt, hat eine Brennweite von 1500 mm. Als Sensor dient ein CCD-Chip, der mit 800 x 800 Pixeln bestückt ist. Die schnellste Bildfolge beträgt 2 1/3 Sekunden, und das gesamte Kamerasystem ist bei Wellenlängen zwischen 0,4 und 1 Mikrometer sensitiv. Acht verschiedene Filter erlauben auch Farbaufnahmen. Mit dem Spektrometer NIMS kann die Zusammensetzung von Atmosphären und Oberflächen studiert werden. Es ist für Wellenlängen von 0,7 bis 5,2 Mikrometer ausgelegt und umfasst damit einen Bereich, in dem zahlreiche für Gesteine und Eis-Arten diagnostische Farbstrukturen (sogenannte Absorptionsbanden) liegen.

Cruise-Phase und Jupiterankunft

Galileo wurde Anfang der 80er Jahre gebaut. Der für Mai 1986 geplante Start musste auf Grund des Challenger-Unfalls im Januar 1986 zunächst abgesagt werden, und Galileo wurde von Cape Canaveral in Florida wieder zurück nach Pasadena in Kalifornien zu dem Ort transportiert, wo die Sonde gebaut wurde. Später wurde ein neuer Starttermin für Oktober 1989 angesetzt.

Gravierender als die Startverschiebung war aber die Entscheidung der NASA, die für Galileo vorgesehene Oberstufe „Centaur“, die mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben wird, für Shuttle-Starts nicht mehr zuzulassen. Damit existierte keine Raketenoberstufe mehr, mit der Galileo direkt zum Jupiter hätte fliegen können. Der Ausweg war eine „Kreuzfahrt“ durch das innere Sonnensystem, bei der Galileo an der Venus und zwei Mal an der Erde vorbeifliegen musste, um durch sogenannte „Swing-by-“ oder „Gravity-Assist-

Manöver“ Bewegungsenergie von diesen Planeten für die Reise zum Jupiter abzapfen. Dadurch verlängerte sich die Reisezeit der sogenannten „Cruise-Phase“ von 2 1/2 auf über sechs Jahre, und Jupiter konnte nach erfolgreichem Start am 18. Oktober 1989 erst im Dezember 1995 erreicht werden.

Andererseits boten diese „Extrarunden“ um die Sonne auch Gelegenheiten, die bei einem Direktflug nicht gegeben sind. Galileo konnte jetzt nämlich die Venus, zwei Asteroiden, unsere Erde und insbesondere den Erdmond mit seinen Instrumenten detailliert untersuchen. So sicherte sich Galileo mit dem ersten Vorbeiflug an einem Asteroiden in der Geschichte der Raumfahrt schon einen Platz in den Geschichtsbüchern, lange bevor das eigentliche Ziel Jupiter erreicht wurde. (951) Gaspra wurde am 29. Oktober 1991 fotografiert und entpuppte sich als unregelmäßiger, von Einschlagskratern übersäter Gesteinsbrocken von etwa 11 km mal 19 km Größe. Auch der zweite untersuchte Asteroid, (243) Ida, hatte eine schöne Überraschung parat: Dieser Asteroid wird von einem kleinen Mond begleitet, der später Dactyl genannt wurde. Mehrere Jahre lang war Dactyl der einzige fotografierte Asteroidenmond, und erst vor kurzem gelang es einigen Astronomen, auch von der Erde aus Monde von fünf weiteren Asteroiden direkt abzubilden.

Die Beobachtungen des Erdmondes waren ebenfalls von großer Bedeutung, da Galileo erstmals die in Flugrichtung weisende Seite (die sogenannte „Leading side“) sowie die Nordpolregion unseres Trabanten in mehreren Farbfiltern und mit den Spektrometern untersuchen konnte. Diese Gebiete sind von der Erde aus zum Teil nicht einsehbar, und zu Apollo-Zeiten standen solche Beobachtungssysteme noch nicht zur Verfügung. Auch für die Kalibration der Instrumente hatten diese Aufnahmen eine große Bedeutung.

Ein „Extra“ waren die Beobachtungen des Kometen Shoemaker-Levy-9, dessen kilometergroße Bruchstücke im Juli 1994 in die Jupiteratmosphäre einschlugen. Von der Erde aus lagen die Einschlagspunkte alle hinter der Jupiterscheibe; nur Galileo konnte die Trefferzone direkt sehen und somit trotz der relativ geringen Bildauflösung von 2.500 Kilometer pro Bildpunkt einen entscheidenden Beitrag

zur zeitlichen Abfolge der Explosionsergebnisse liefern. Anders ausgedrückt: Galileo lieferte den „Zeitpunkt Null“, und die irdischen Teleskope beobachteten die beeindruckenden Folgen der gewaltigsten Explosionen, die jemals auf einem Planeten beobachtet wurden und die – wenn sie denn auf der Erde stattgefunden hätten – unsere Zivilisation zerstört hätten.

Leider gab es auch technische Schwierigkeiten, die den beteiligten Managern, Ingenieuren und Wissenschaftlern große Sorgen bereiteten. Am 11. April 1991 sollte eigentlich die wie ein Regenschirm zusammengefaltete Hauptantenne Galileos geöffnet werden – doch sie klemmte. Zahlreiche Versuche in den kommenden Monaten und Jahren, die Antenne doch noch zu öffnen, gelangen nicht. Als Ursache für das Problem wird angenommen, dass die Schmierung an einigen beweglichen Streben, die am Zentralmast entlang gleiten sollten, nicht ausreichend war. Doch wie war das möglich – auch unter dem Gesichtspunkt, dass alle anderen Antennen gleichen Typs, die in den TDRS-Nachrichtensatelliten der NASA eingesetzt wurden, sich immer korrekt entfalteten? Als wahrscheinlichster Grund wird der dreifache (Land-) Transport über den amerikanischen Kontinent vermutet. Das „Ruckeln“ auf den Straßen dürfte langsam das Schmiermittel ausgetrieben haben, und an vermutlich drei der 18 Streben hat es dann nicht mehr ausgereicht.

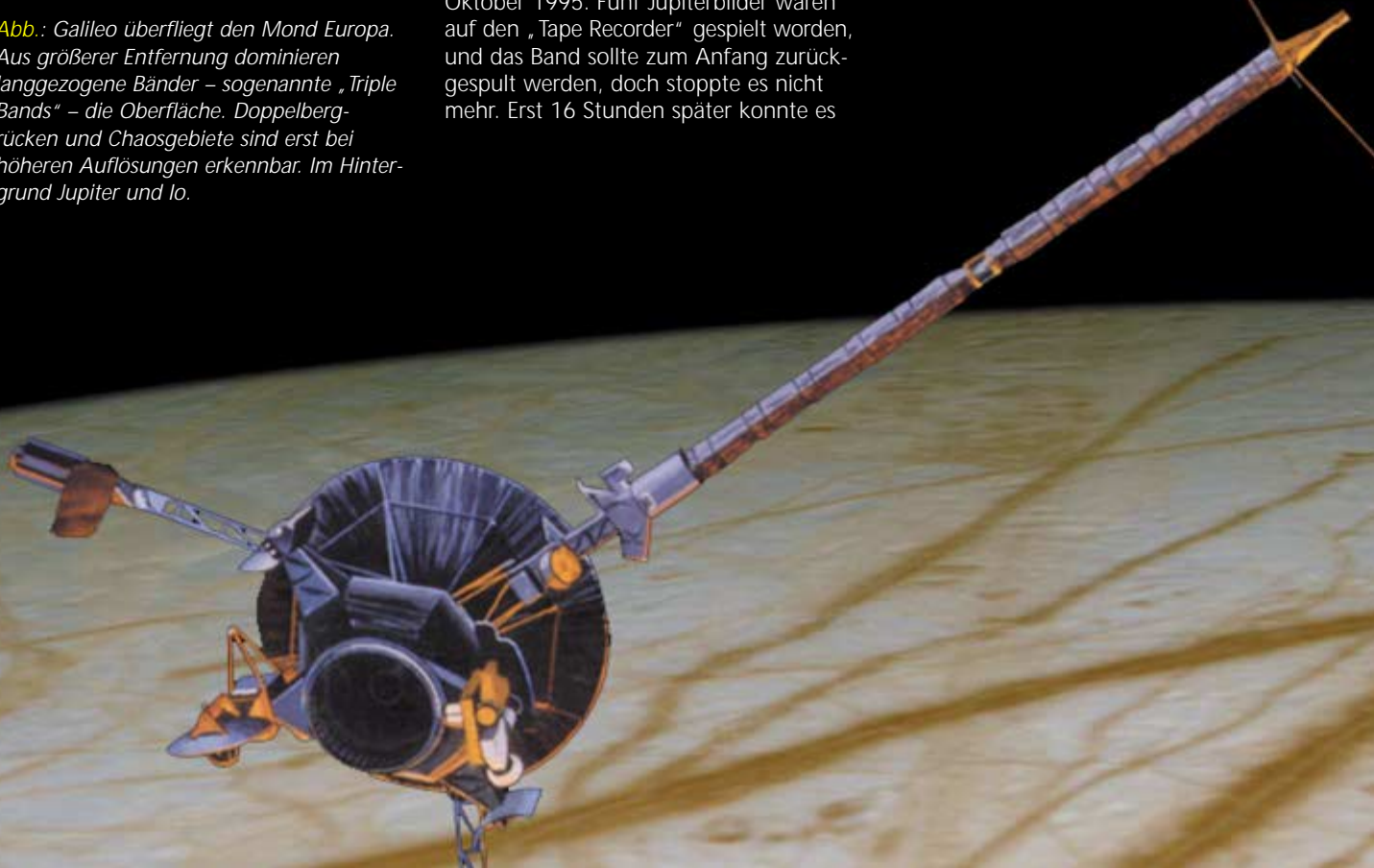
Abb.: Galileo überfliegt den Mond Europa. Aus größerer Entfernung dominieren langgezogene Bänder – sogenannte „Triple Bands“ – die Oberfläche. Doppelberg-rücken und Chaosgebiete sind erst bei höheren Auflösungen erkennbar. Im Hintergrund Jupiter und Io.

Die Galileo-Wissenschaftler mussten jetzt also mit einer Datenrate von 10 bis 30 bit pro Sekunde anstatt der ursprünglich geplanten 134.000 bit/sec leben – statt mit einem Bild pro Minute also theoretisch mit einem Bild in fünf Tagen. Zum Glück konnten in verschiedenen Bereichen Veränderungen vorgenommen werden, so dass der tatsächliche Schaden erheblich kleiner ausfiel. Beispielsweise konnte durch Umprogrammierung der Bordcomputer im Frühjahr 1996 Galileo die Fähigkeit zur Datenkompression gegeben werden. Andere Hilfen waren die Vergrößerung der Empfangsantennen auf der Erde und die Schaffung der Möglichkeit, große Antennen im Verbund zusammenzuschließen und so eine größere Antenne zu simulieren und damit eine etwas höhere Datenrate von bis zu 160 bit/sec zuzulassen. Der wichtigste Aspekt aber war die Nutzung des sogenannten „Tape Recorders“ an Bord der Sonde. Auf diesem Bandgerät können etwa 860 Megabits an Daten zwischengespeichert werden, die dann in den nachfolgenden Tagen und Wochen zur Erde übertragen werden. Obwohl im Endeffekt nur etwa zwei Prozent der ursprünglich geplanten Bildmenge erhalten wurden, schätzt man, dass dennoch etwa 70 Prozent der geplanten Wissenschaft absolviert werden konnten. Die größten Einbußen hatten die Jupiter-Langzeit-Wetterbeobachter hinzunehmen.

Die andere „große Schrecksekunde“ neben dem Antennenproblem ereilte uns zwei Monate vor der Jupiterankunft im Oktober 1995. Fünf Jupiterbilder waren auf den „Tape Recorder“ gespielt worden, und das Band sollte zum Anfang zurückgespult werden, doch stoppte es nicht mehr. Erst 16 Stunden später konnte es

per Bodenbefehl angehalten werden. War das Band gerissen oder ein wichtiges Bauteil irreparabel beschädigt, so wie es bei einem baugleichen Gerät bei Tests am Boden am selben Tag passiert war? Zum Glück nicht, denn ohne „Tape Recorder“ wäre die Mission wohl dem Ende nahe gewesen. Tatsächlich war das Band an einer Stelle leicht festgeklebt und hatte sich 16 Stunden lang gar nicht bewegt, während das Antriebsrädchen nur am Band „leicht scheuerte“. Durch langsames Vorwärtslauflassen neun Tage nach der Anomalie konnte es wieder „losgerissen“ werden und stand für die Orbit-Tour mit etwas eingeschränkter Kapazität (nur noch 84 Prozent des Bandes durften benutzt werden) wieder zur Verfügung.

Die Probe war am 13. Juli 1995 abgestoßen worden und bewegte sich ballistisch (antriebslos im freien Fall) auf Jupiter zu. Galileo musste für dieses Manöver auf Kollisionskurs mit Jupiter gehen, da die Probe keinerlei eigenen Antrieb besaß. Einige Tage nach dem Absetzen wurde die Bahn des Orbiters dann korrigiert. Hierbei wurde erstmals das bei Astrium (damals noch MBB) in Ottobrunn bei München gebaute Haupttriebwerk eingesetzt. Es funktionierte – wie auch noch zwei weitere Male – fehlerfrei.



Einer der spannendsten Tage für das Galileo-Projekt war dann der 7. Dezember 1995, der Tag der Jupiterankunft und der Probe-Mission. Der Orbiter vollführte ein Swingby-Manöver am Mond Io, das über 1/5 der zum Abbremsen nötigen Geschwindigkeitsänderung von fast 3.000 km/h lieferte. Auf Grund des nur zwei Monate zurückliegenden „Tape-Recorder“-Problems, das die Entwicklung von neuen „Tape-Benutzungsregeln“ erzwang (die natürlich nicht innerhalb von zwei Monaten implementiert werden konnten), war dieser Io-Vorbeiflug leider nicht für die Fernerkundungsinstrumente wie die Kamera nutzbar. Tatsächlich sollte es fast vier Jahre dauern, bis Galileo wieder so nahe an Io heran kam.

Die Probe wurde unterdessen von der gewaltigen Jupitermasse auf 170.000 km/h beschleunigt, um dann mit dem Hitzeschild voraus auf die Atmosphäre zu prallen und in nur zwei Minuten auf Autobahn-Reisegeschwindigkeit abgebremst zu werden. Anschließend wurde der Hitzeschild abgeworfen, der Fallschirm öffnete sich, und die eine Stunde dauernde wissenschaftliche Mission konnte beginnen. In dieser Zeit wurden grundlegende Informationen über die Jupiteratmosphäre zum Orbiter gesendet und dort zwischengespeichert. So kennt man jetzt besser die Gewitterhäufigkeit und die Stärke der Blitzentladung, die chemische Zusammensetzung der oberen Atmosphäre, die Wind- und Strömungsverhältnisse sowie das Verhältnis von Wasserstoff zu Helium in der oberen Jupiteratmosphäre, das einiges über die Entstehungsgeschichte der Gasplaneten aussagt. Die Sender der Probe überlebten eine Stunde lang bis zu einer Außentem-



peratur von +153 ° C und einem Umgebungsdruck von 22 bar in einer Tiefe von 145 Kilometer. Verglichen mit dem Jupiterradius von 71.400 Kilometer ist das nicht viel; dennoch gab uns die Probe erstmals „Live-vor-Ort-Einsichten“ aus dem Inneren eines Gasplaneten.

Eineinviertel Stunden nach dem Ende der Probe-Mission begann die 49-minütige Zündung des Haupttriebwerks, die Galileo endgültig zu einem Gefangenen des Riesenplaneten machte. Die erste Umlaufbahn war sechs Monate lang und beinhaltete an ihrem Ende im Juni 1996 den ersten gezielten Ganymed-Vorbeiflug der jetzt folgenden „Orbit-Tour“ Galileos.

Jupiter-Orbit-Tour

Galileos „Orbit-Tour“ kann in zwei sich abwechselnde Phasen eingeteilt werden: (1) Gezielter Vorbeiflug im inneren Jupitersystem an einem der Galileischen Monde mit intensiver Datengewinnung und (2) Phase des Herunterspielens der Daten zwischen den Vorbeiflügen. In den ersten zwei Jahren dauerte die erste Phase jeweils etwa eine Woche und wurde später auf etwa drei Tage reduziert. Zunächst waren zehn gezielte nahe Vorbeiflüge bei elf Umläufen oder Orbits geplant: Vier an Ganymed (G1, G2, G7, G8), drei an Callisto (C3, C9, C10) und drei an Europa (E4, E6, E11). Die Ziffer verweist dabei auf den Orbit Galileos, der Buchstabe auf den dabei direkt angeflogenen Mond. Io-Vorbeiflüge waren keine vorgesehen, da die Belastung durch hochenergetische geladene Teilchen, die im Jupitermagnetfeld gefangen sind, in Io-Nähe so groß ist, dass die Sonde dort nicht allzu lange überleben kann. Beispielsweise nahm Galileo allein am Ankunftstag etwa ein Drittel der Strahlenbelastung auf, für die die Sonde ausgelegt war. Es erschien zu riskant, Galileo erneut in diese Gefilde zu schicken.

Abb.: *Eines der wichtigsten Ziele der Galileosonde ist die Erkundung des vulkanisch aktiven Mondes Io. Seine Oberfläche wird rasend schnell umgestaltet, beispielsweise entwickelte sich der schwarze Fleck links unterhalb der Bildmitte zwischen April und September 1997 innerhalb weniger Monate. Pyroklastisches Auswurfmaterial des Vulkans Pillan bedeckt hier ein Gebiet von der halben Größe Deutschlands. Der markante rote Ring gehört zu Pele, einem der größten Vulkane im Sonnensystem.*

Während der nominellen Mission wurden natürlich auch die anderen Galileischen Monde, die kleinen, innersten Jupitermonde und die Ringe sowie natürlich die Wolken und das Magnetfeld von Jupiter selbst unter die Lupe genommen. Die nominelle Mission gelang fast ohne nennenswerte technische Schwierigkeiten und endete im Dezember 1997 kurz vor dem E12-Vorbeiflug, der den Auftakt der „Galileo Europa Mission“ oder kurz „GEM“ markierte. Ziel der GEM war es, den Mond Europa eingehender zu studieren, als dies während der nominellen Mission möglich war. Europa wurde als Forschungsobjekt der höchsten Priorität ausgewählt, da unter ihrer Eiskruste ein Wasserozean vermutet wird. Galileo sollte weitere Daten liefern, welche diese These stützen oder widerlegen könnten.

Leider stellten sich mit Beginn der GEM die ersten „Macken“ bei Galileo ein, und das Projektmanagement wurde gezwungen, zu improvisieren. Dennoch gelang es, den größten Teil der Daten der Vorbeiflüge E12, E14 und E15 zur Erde zu übertragen (bei E13 wurden die Kameras planmäßig nicht eingeschaltet). Vor E16 ging Galileo dann aber in den sogenannten „Saving mode“, da der Bordcomputer abgestürzt war, und keine Daten konnten gewonnen werden. Dies war insofern besonders ärgerlich, da für den E16-Vorbeiflug eine ungewöhnlich große Datenmenge vorgesehen war. Immerhin konnten einige Beobachtungen bei E17 gerettet werden. Bei E18 dann dasselbe Pech: Wieder konnten keine Daten aufgenommen werden. Auf der Erde war inzwischen eine Software in Entwicklung, die diese Art von Computer-Abstürzen verhindern sollte. Sie war ab C20 einsatzbereit und hat seitdem praktisch jeden Vorbeiflug „gerettet“. E19 am 1. Februar 1999 musste noch ohne diese Software auskommen, dennoch gelang die Aufnahme des größten Teils der geplanten Europa-Daten.

E19 markierte auch gleichzeitig den Abschluss der Europa-Phase. Galileo war bereits über drei Jahre erfolgreich, und man konnte sich jetzt an eine noch unerledigte Aufgabe wagen: Nahe Vorbeiflüge am vulkanisch aktiven Mond Io. Hierfür waren im Sommer 1999 zunächst vier Callisto-Vorbeiflüge (C20-C23) nötig, um mit Hilfe von Gravity-Assist-Manövern den Jupiter-nächsten Punkt der Galileo-Bahn im

mer weiter an die Io-Bahn anzunähern. Am 11. Oktober 1999 war es schließlich so weit: Galileo kam auf 612 Kilometer an Io heran. Einen Tag zuvor großes Bangen: Wieder versetzte ein Computer-Absturz Galileo in den „Save-Modus“, I24 erschien massiv gefährdet. Sofort wurde eine „Notfall-Software“ nach oben geschickt – diese war erst in der Woche zuvor „vorsorglich“ für den Fall geschrieben worden, dass auf Grund der immensen Strahlung eine RAM-Speicherzelle beschädigt werden könnte. Sie setzte dann nicht nur den Computer wieder in Gang, sondern kommandierte auch die nachfolgenden Beobachtungen ordnungsgemäß – der erste „richtige“ Io-Vorbeiflug war gerettet.

Etwas ernüchternd waren jedoch die ersten hochaufgelösten Bilder von Io. Es schien, als ob die Kamera in einem bestimmten Aufnahmemodus die Bildpunkte der linken und rechten Bildszenen übereinanderkopiert hätte. Später gelang es dann, die Bildhälften mit statistischen Methoden wieder auseinander zu rechnen und somit wissenschaftlich nutzbare und ästhetisch ansprechende Bilddaten zu erhalten. I25 Ende November 1999 wäre ebenfalls beinahe gescheitert, doch auch hier konnte Galileo wieder flott gemacht werden. Lediglich die höchstaufgelösten Daten und die Magnetfeldmessungen gingen verloren, dafür stand dann mehr „Downlink“ für die niedriger aufgelösten Daten (100 m pro Bildpunkt und weniger) zur Verfügung. Hier gelang bei der Aufnahme einer Lavafontäne im Gebiet „Tvashtar“ eine der spektakulärsten Galileo-Aufnahmen überhaupt.

Eigentlich sollte Galileo längst den Strahlentod gestorben sein, doch die Sonde lebte noch immer. Also wurde die Mission erneut verlängert und erhielt die Bezeichnung „Galileo Millennium Mission“ oder „GMM“. Der ultimativ letzte Europa-Vorbeiflug (E26) Anfang Januar 2000 markierte das Ende der GEM und den Beginn der GMM und stellte zugleich auch die „Y2K-Festigkeit“ Galileos unter Beweis – nach dem Jahr „99“ folgte für Galileo einfach das Jahr „100“. Ein neues ehrgeiziges Ziel bestimmte die Galileo-Flugbahn der GMM: Das „Rendezvous“ mit der Cassini-Sonde zum Jahreswechsel 2000/2001. Hierzu musste Galileo auf eine hochezentrische Bahn gebracht werden, um möglichst selten in gefährliche Jupiternähe zu kommen. Mit den beiden technisch perfekten Vorbeiflügen I27 im

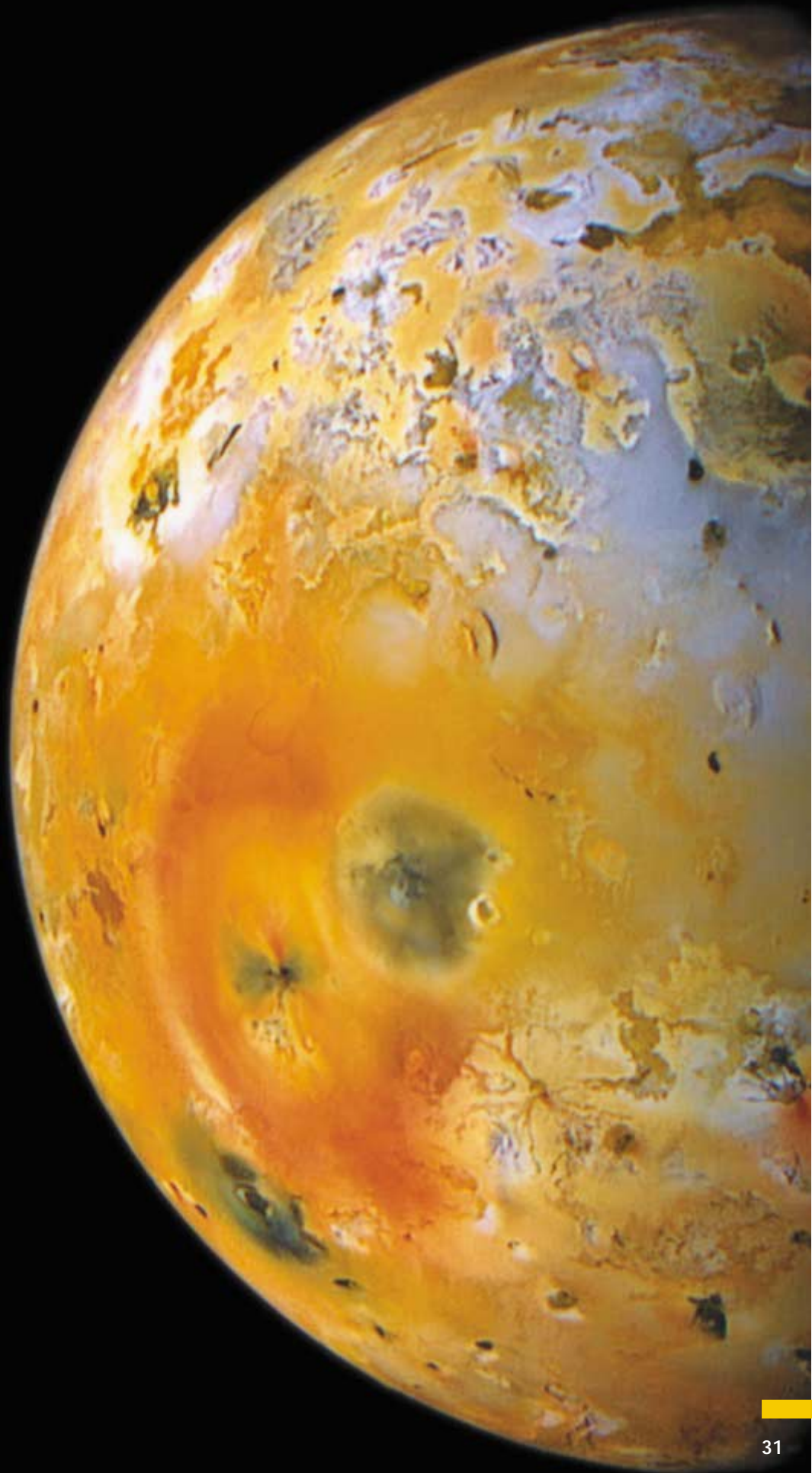
Februar und G28 im Mai 2000 – der erste gezielte Ganymed-Vorbeiflug seit Mai 1997 – wurde dies erreicht. Erst ein halbes Jahr nach G28 kam Galileo wieder in Jupiternähe, um zeitgleich mit Cassini die Monde und den Gasplaneten sowie seine Ringe und Magnetosphäre studieren zu können.

Auch G29 gelang – und Galileo lebt immer noch. Für die Zukunft ist eine erneute Rückkehr zu Io geplant, insbesondere um die beim polaren I25-Vorbeiflug verlorenen Magnetometermessungen höchster Priorität noch einmal durchführen zu können. Im Mai 2001 wird es demnach noch den letzten Callisto-Vorbeiflug (C30) geben, und im Herbst/Winter 2001/2002 können noch bis zu drei Io-Vorbeiflüge absolviert werden. Sollte Galileo dann immer noch funktionsfähig sein, wäre sogar noch ein Novum möglich. Die momentane Planung wird Galileo im November 2002 bis auf 500 km an den kleinen Mond Amalthea und bis auf nur noch 70.000 Kilometer an die Jupiter-Wolkenoberfläche heranbringen. Nach diesem A34-Vorbeiflug beginnt dann Galileos 35. und letzte Runde, die im September 2003 mit einem Einsturz in die Jupiteratmosphäre enden wird.

Eine Fülle von neuen Informationen enthalten die Daten, welche Galileo zur Erde gesendet hat. Das Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung ist dabei an der Auswertung der SSI-Kamera-Daten der Galileischen Monde beteiligt. Daher wird im Nachfolgenden auf die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Forschungen eingegangen, obwohl natürlich die Jupiter-Atmosphären-, Magnetosphären-, Staub- oder Ringforschungen ebenso einen Platz verdient hätten. Begonnen wird mit Io, dem „brodelnden“ Vulkanmond, dessen Oberfläche so rasant umgestaltet wird, dass bis heute noch kein einziger Impaktkrater in den Daten gefunden werden konnte.

Io

Beinahe vier Jahre waren seit der Ankunft der Raumsonde Galileo im Jupitersystem vergangen, bis sie schließlich am 11. Oktober 1999 über die feuerspeienden Vulkankegel und Lavafelder des Jupitermondes Io hinweggraste. Die Kamera arbeitete auf Hochtouren, um soviel wie möglich dieser einzigartigen Vulkanlandschaften aufzunehmen, war es doch das erste



Mal, dass wir Menschen einen Blick auf die Details dieser fremden Welt werfen durften. Zwei weitere Vorbeiflüge folgten am 26. November 1999 und 22. Februar 2000 ebenfalls in Höhen von wenigen Hundert Kilometern – eine Distanz, die es der Kamera an Bord erlaubt, Details mit wenigen Metern Abmessung zu erkennen. Im Vergleich zu den Aufnahmen der Voyager-Raumsonden, die 1979 das Jupitersystem durchquerten, ist dies eine Steigerung um beinahe zwei Größenordnungen – entsprechend verfeinert hat sich unser Bild dieses geologisch aktivsten Himmelskörpers unseres Sonnensystems.

In Bezug auf Io wurden die ersten vier Jahre der Galileo-Mission zur Vorbereitung dieses Höhepunktes genutzt. Ein wesentlicher Programmpunkt war das „Monitoring“ der vulkanischen Aktivität. Gezielt wurden dann während der Vorbeiflüge aktive Vulkane und frische Lavaströme aus Eruptionen der vorhergehenden Jahre beobachtet. Am Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des DLR wurden die Aufnahmen dieser Jahre genutzt, das bislang genaueste Kontrollnetz (Punkte an der Oberfläche mit exakt bestimmten Koordinaten) von Io zu erstellen. Eine geophysikalische Auswertung dieses Kontrollnetzes erlaubte es unter anderem, die Existenz eines schweren Kerns im Inneren von Io (ähnlich wie im Inneren der Erde) nachzuweisen. Seit 1979 ist bekannt, dass auf Io gigantische (Hunderte von Kilometern hohe) Gaseruptionen aufsteigen. Die gängige Theo-

rie in Analogie zum irdischen Vulkanismus war, dass es sich dabei um Vulkanausbrüche handelt, bei denen heiße Gasfontänen aus den Vulkanschloten ausgestoßen werden. Eine gezielte Vermessung der Ursprungsorte dieser Eruptionen im Rahmen der Kontrollnetzberechnungen ergab jedoch überraschenderweise, dass diese Ursprungsorte auf dem durchschnittlichen Höhengniveau der Oberfläche von Io lagen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu gängigen Vorstellungen über irdischen Vulkanismus. Hätten die Eruptionsfontänen ihren Ursprung auf Vulkangipfeln (wie dies üblicherweise auf der Erde der Fall ist), so müsste der Ausgangsort signifikant höher als die mittlere Oberfläche von Io liegen.

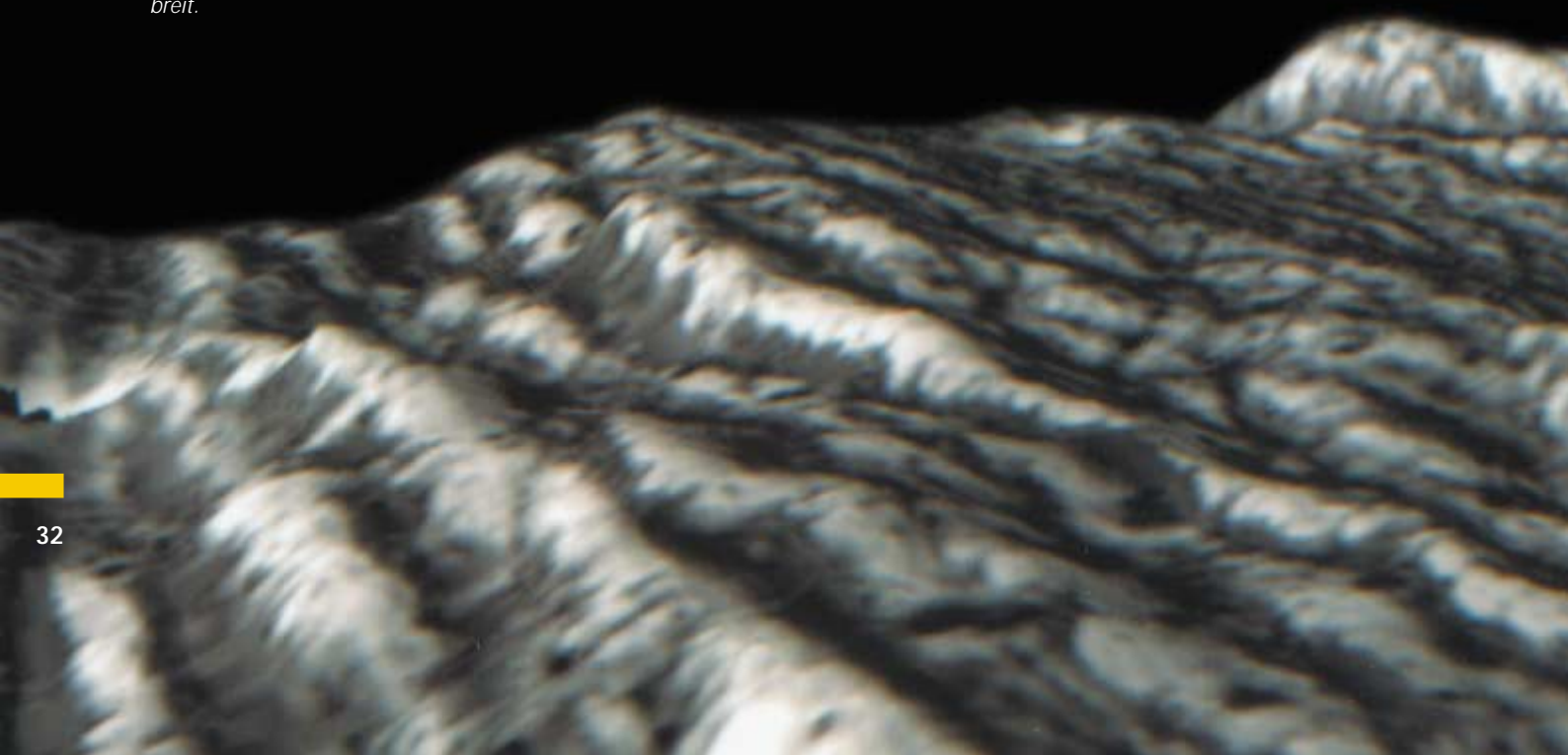
Es gab noch einen weiteren Anlass zu zweifeln: Prometheus, einer der großen Vulkane auf Io, war schon zu Zeiten von Voyager aktiv und zeigte auch in den Aufnahmen der Raumsonde Galileo seine typische Eruptionsfontäne – aber um 70 Kilometer nach Westen versetzt! Ein solches Verhalten schien in diesem Kontext nur sehr schwer verständlich. Selbstverständlich stand daher die Suche nach dem Ursprungsort der promethischen Fontäne – nach herkömmlicher Vorstellung also nach einem Vulkanschlot – auf der Prioritätenliste für die gezielten Io-Vorbeiflüge weit oben. Die Bilder zeigten eine Vielzahl von interessanten geologischen Strukturen – doch am Ursprungsort der Eruptionsfontäne fand sich kein Vulkanschlot. Im Gegenteil, dort schien sich nicht der Ausgangsort vulkanischer Aktivität zu befinden, sondern der vorläufige Endpunkt, die Spitze eines 70 Kilometer langen Lavaströms. An der Front der vordringenden Lava wurden Hinweise

für eine Vielzahl von kleinen Gasquellen gefunden. Damit drängte sich eine alternative Erklärung für die promethische Eruptionsfontäne auf: sie wird nicht durch direkt beim Ausbruch freiwerdende Gase gebildet, sondern heiße Lava, die über -130 °C kalte Schwefeldioxid-Ebenen fließt, bringt das SO₂ explosionsartig zum Verdampfen. In den vergangenen zwanzig Jahren seit Voyager hat sich also die Front des Lavaströms um 70 Kilometer voranbewegt. Der Ursprungsort der Gase liegt nicht auf einem Vulkangipfel, sondern in der weiten Ebene – und seine Höhe auf dem durchschnittlichen Höhengniveau von Io.

Während bei Prometheus diese Erklärung durch eine Vielzahl von Beobachtungen gestützt wird, ist noch nicht eindeutig belegt, dass dieses Modell auch für die anderen Vulkane auf Io zutrifft, doch die Höhenmessungen lassen vermuten, dass es ebenso die richtige Erklärung für eine überwiegende Mehrheit der vulkanischen Eruptionsfontänen auf Io ist.

Vielleicht die wichtigsten Erkenntnisse gewinnt man in der Wissenschaft, wenn man auf völlig Unvorhergesehenes stößt. Sicher unerwartet war die Entdeckung von dünenähnlichen Strukturen auf Io. Diese sind erst ab einer Bildauflösung von ca. 200 Meter pro Bildpunkt zu erkennen und blieben deshalb bisher unentdeckt. Zuerst gefunden wurden sie in Teilen der Prometheus-Aufnahmen; später stellte sich heraus, dass vermutlich ein großer Teil der Oberfläche von Io von diesen Strukturen bedeckt ist. Dünen sind auf anderen Himmelskörpern gut bekannt, in

Abb.: Uruk Sulcus gehört zu den hellen Gebieten auf Ganymed und ist von zahllosen Bergrücken durchzogen. Der helle Berg im Hintergrund ist etwa 15 Kilometer breit.



den Wüsten auf der Erde wie auch auf dem Mars. Doch zwei Dinge sind notwendig zur Dünenbildung: loses, feinkörniges Material und Wind. Da Io keine nennenswerte Atmosphäre besitzt, weht auf Io auch kein Wind. Zwar könnten bei Vulkanausbrüchen kurzfristig höhere Gasdrücke entstehen, doch es scheint schwer vorstellbar, dass dies über Tausende von Jahren anhält. Die Bildung von Dünen im eigentlichen Sinne scheint also ausgeschlossen; was wir wirklich sehen und wie diese Strukturen entstanden sind, ist das neueste Rätsel, das Io uns aufgibt.

Die spektakulärste Io-Aufnahme stammt von Tvashtar, einem Vulkan, der weit im Norden von Io liegt. Mehrere gigantische, ineinander verschachtelte vulkanische Einsturzkrater (Calderen) mit Durchmessern von 100 bis 200 Kilometer befinden sich auf seinem Gipfelplateau. Ursprünglich waren Aufnahmen vorgesehen, um diese ungewöhnliche Struktur genauer zu betrachten, doch der glückliche Zufall wollte es, dass Tvashtar eben zu dem Zeitpunkt ausbrach, als die Raumsonde an Io vorbeiflog. Eine Spalte am Boden der Caldera öffnete sich und flüssige Lava trat aus. Während Gasaustritte regelmäßig gesehen werden, ist dies der erste Fall, in dem direkt ein Ausbruch flüssiger Lavamassen beobachtet wurde. Das Glühen der Lava war so hell, dass Teile der Aufnahme überbelichtet wurden, doch Details des Ausbruches konnten rekonstruiert werden. Vermutlich wurde der Beginn eines Ausbruches beobachtet. Eine Spalte brach auf einer Länge von 30 Kilometer auf, und Fontänen der glühenden Lava wurden mehrere hundert Meter in die Höhe geschleudert, bevor sie zu Boden fielen und als Lavastrom abflossen.

Weitere Aufnahmen einige Monate später zeigten, dass dieser Ausbruch kurz, aber heftig gewesen sein musste, und mittlerweile hatte auch in der zweiten Caldera ein Lavaausbruch stattgefunden: frische, noch heiße Lava bedeckte den Boden der Caldera. Obwohl es schwierig ist, von einem Ereignis statistische Aussagen zu treffen, ist doch klar, dass diese Art von Ausbrüchen vermutlich recht häufig stattfinden muss. Die Chance, einen solchen Ausbruch live mitzubekommen, wären sonst verschwindend gering. Globale Io-Bilder vom G29-Vorbeiflug letzten Dezember zeigten schließlich das ganze Ausmaß der Tvashtar-Eruption: Im Jahr 2000 hatte sich ein roter Ring aus schwefelhaltigem Auswurfmaterial von etwa 1.400 Kilometer Durchmesser gebildet, und Cassini-Aufnahmen zeigten eine Eruptionsfontäne von fast 400 Kilometer Höhe!

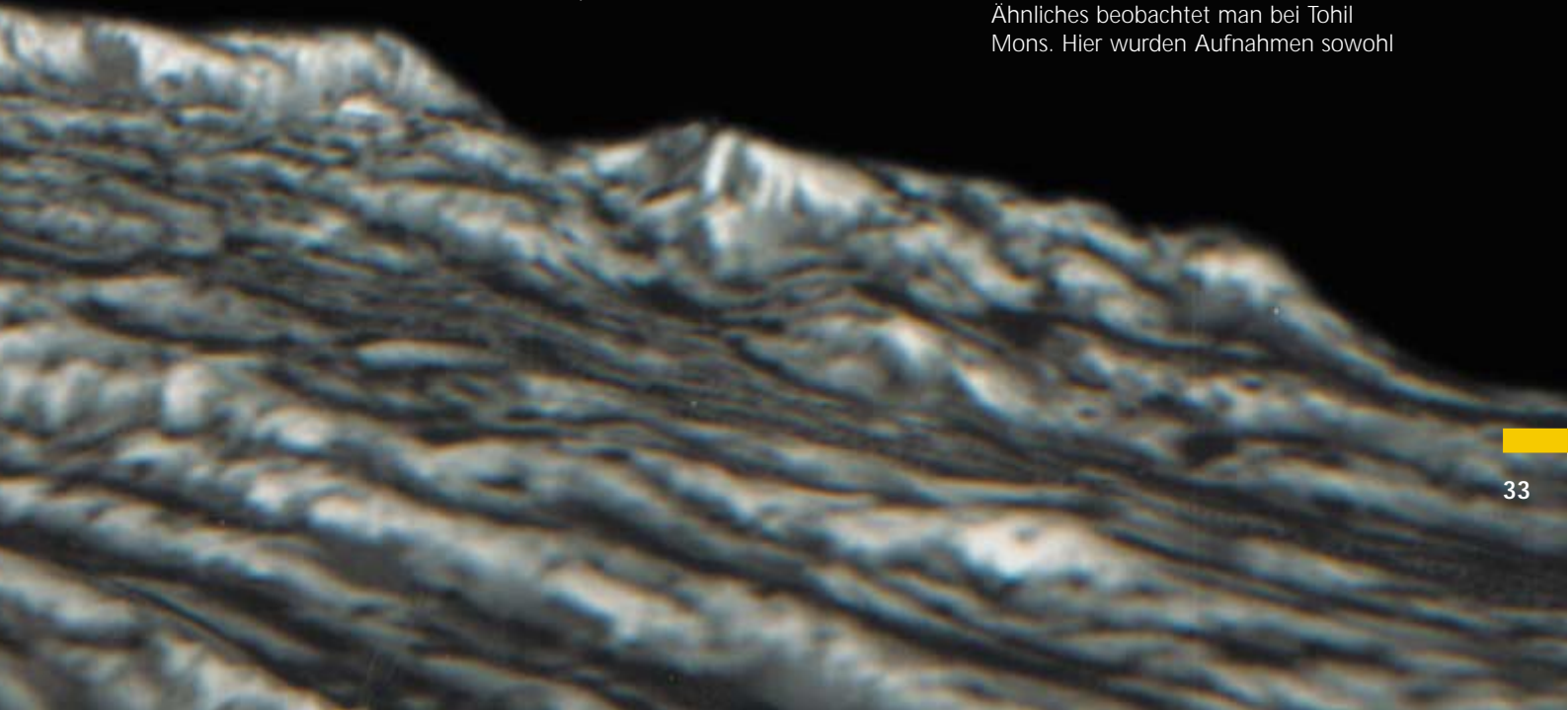
Damit ist Tvashtar mit den beiden bislang größten Io-Vulkanen Pele und Loki vergleichbar, die ebenfalls auf dem Beobachtungsprogramm standen. Die Ablagerungen der Ausbrüche von Pele bedecken wie bei Tvashtar ein Gebiet von weit mehr als 1.000 Kilometer Durchmesser. Damit steht Pele an der Spitze der ionischen Vulkane. Im Zentrum von Pele liegt eine etwa 150 Quadratkilometer große Caldera. Das Leuchten heißer Lava in Nachtaufnahmen von Pele zeigte, dass diese Caldera mit flüssigem Gestein gefüllt ist. Zwar hat sich an der Oberfläche schon eine dunkle Kruste gebildet, doch bricht diese besonders am Rand der Caldera immer wieder auf und erlaubt einen Blick in ihr heißes Inneres.

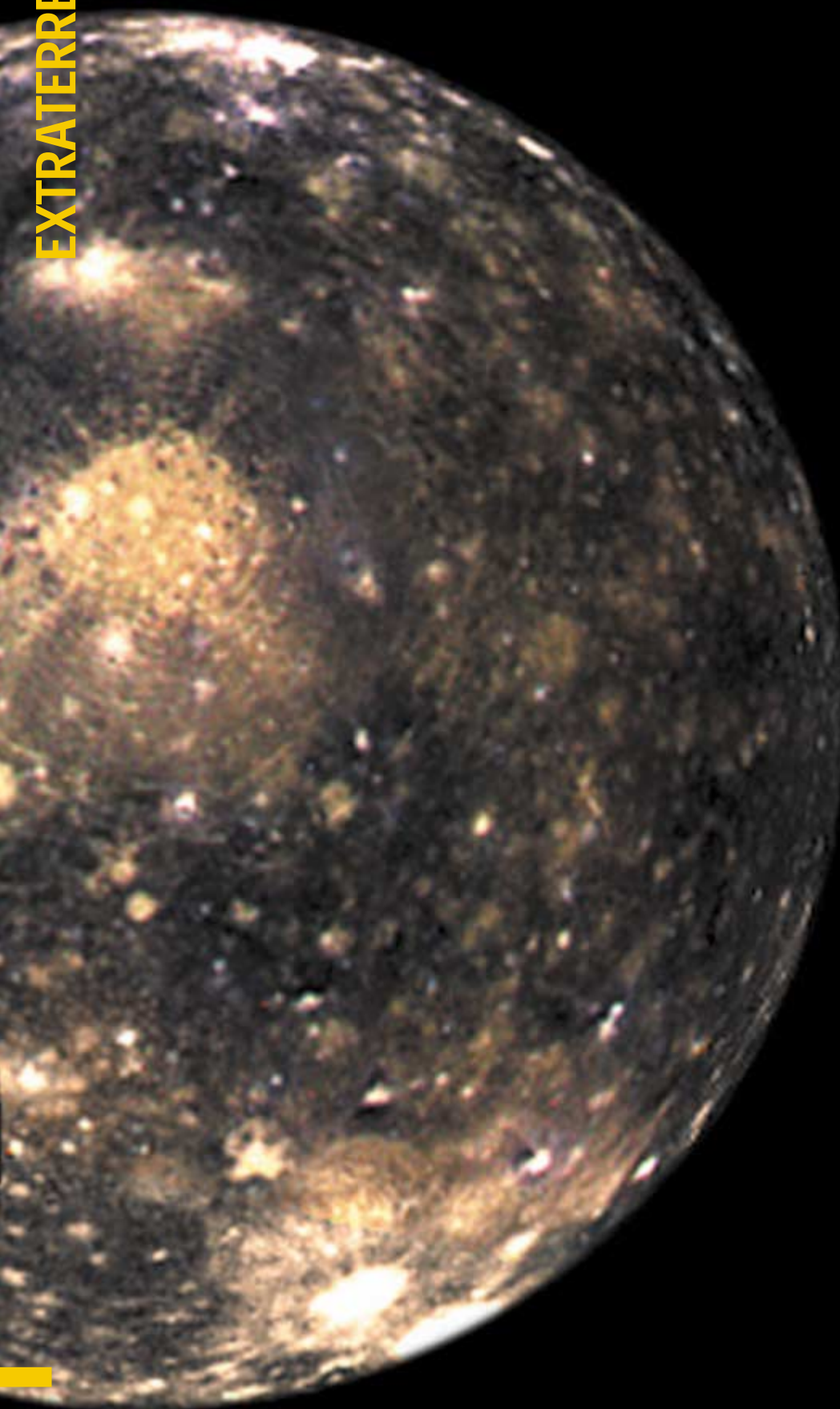
Schon vor den Vorbeiflügen war bekannt, dass nirgendwo auf Io mehr Wärmeenergie und damit Magma an die Oberfläche transportiert wird als bei Loki. Zwar ver-

riet sich Loki nicht durch ein nächtliches Leuchten seiner Lava, doch Aufnahmen im Infraroten zeigten, dass auch seine Caldera mit heißer Lava gefüllt ist. Wie bei Pele ist die Oberfläche teilweise erkaltet, doch darunter brodelt und kocht es immer noch. Mit einem in der Caldera enthaltenen Lavavolumen von mehreren zehntausend Kubikkilometern liegt Loki weit vor allen ionischen und irdischen Vulkanen.

Neben seiner überbordenden vulkanischen Aktivität ist Io auch für eine beeindruckende Topographie bekannt. Die Erforschung dieses Aspektes ist ein Forschungsschwerpunkt im Galileoprogramm. Man findet auf Io Berge mit Höhen von mehr als 15 Kilometer und steilen, hochalpin anmutenden Flanken. Über ihren Entstehungsmechanismus wird immer noch gerätselt, doch haben die Beobachtungen von Io sehr enge und interessante Verbindungen von vulkanischen und tektonischen Mechanismen mit den Bergen deutlich gemacht. Hi'iaka Mons ist ein Gebirgszug, der von Galileo beobachtet wurde. Auch wenn seine Entstehung noch rätselhaft ist, so wurde zumindest seine geologische Entwicklung deutlich. Große tektonische Kräfte haben den Berg auseinandergerissen und die beiden Teile getrennt. In der Bruchzone bildete sich eine calderaähnliche Depression, in der sich vulkanische Aktivität zeigt. Aus der Erfahrung mit irdischen Vulkanen zieht man den Schluss, dass Calderen entweder durch den Einsturz einer Magmakammer im Untergrund eines Vulkans oder durch eine Explosion des Vulkangipfels entstehen. Auf Io scheint diese Entwicklung prinzipiell anders abzulaufen, tektonische Prozesse spielen eine wesentliche Rolle bei der Bildung von Calderen.

Ähnliches beobachtet man bei Tohil Mons. Hier wurden Aufnahmen sowohl





bei I24 als auch bei I27 gewonnen. Eine stereophotogrammetrische Auswertung am Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung ergab ein dreidimensionales Modell dieser mehr als acht Kilometer hohen Gebirgsstruktur. Deutlich zeigt sich im digitalen Geländemodell eine große tektonische Störung. Im Fall von Tohil Mons haben die tektonischen Kräfte (noch?) nicht dazu geführt, den Berg in zwei Teile zu trennen. Auch diese tektonische Störung ist mit einer Reihe von calderaähnlichen Depressionen verbunden, die ausgehend von einer großen in der Ebene liegenden Patera (einer großen, oft unregelmäßig geformten Senke von vermutlich vulkanischem Ursprung) sukzessive kleiner werdend sich in die Gebirgsstruktur fortsetzen. Erstmals können diese in den Gebirgen von Io ablaufenden geologischen Prozesse mit Hilfe dreidimensionaler Daten untersucht werden.

Ganymed

Ganymed ist mit 5.268 Kilometer Durchmesser der größte Mond im Sonnensystem. Er umkreist Jupiter in einer Entfernung von 1 Mio. Kilometer in etwa sieben Tagen. Bereits vor den Voyager-Vorbeiflügen konnte Wassereis an seiner Oberfläche nachgewiesen werden. Die Bilddaten der Voyager-Kameras zeigten bei ihren Vorbeiflügen im Jahre 1979 zwei auffallend unterschiedliche Gebiete: (1) dunkles Gebiet mit einer hohen Kraterdichte, das demnach sehr alt sein muss, und (2) helles, jüngeres Gebiet mit niedrigerer Kraterdichte. Eine weitere Besonderheit Ganymeds ist das Vorhandensein von hellen Polkappen bis herab zu einer geographischen Breite von etwa $\pm 60^\circ$.

Die Galileo-Sonde flog insgesamt sechs Mal an Ganymed vorbei und lieferte dabei Bilddaten bis zu einer Auflösung von 16 m pro Bildpunkt. Bei der Planung der Aufnahme sequenzen konzentrierte man sich insbesondere auf Details in den

Abb.: Callisto ist der äußerste der vier Galileischen Monde. Seine von alten Kratern und Ringgebirgen dominierte Oberfläche zeigt fast keine Anzeichen vergangener geologischer Aktivität. Valhalla (etwas oberhalb der Bildmitte) ist mit einem Durchmesser von über 4.000 Kilometern das größte Ringgebirge im Sonnensystem.

dunklen und hellen Gebieten, auf die Grenze zwischen dem hellen und dunklen Gebiet und auf ungewöhnliche Kraterformen. Abgerundet wurden diese Beobachtungen durch globale Farbbeobachtungen niedrigerer räumlicher Auflösung, aus denen spektrophotometrische Charakteristiken der Oberfläche bestimmt werden können.

Das alte, dunkle Gebiet ist durch Furchen (furrows) charakterisiert, die großen, konzentrischen Systemen angehören, welche sich über mehrere Tausend Kilometer erstrecken. Ihr Ursprung liegt in der durch Einschläge verursachten tektonischen Deformation der Oberfläche, bei denen große, heute stark abgetragene Multi-ringbecken entstanden. Stereoaufnahmen zeigen, dass die Höhenunterschiede innerhalb dieser dunklen Gebiete in der Größenordnung von etwa einem Kilometer liegen. Ein weiteres Charakteristikum der dunklen Gebiete sind helle, mehrere Hundert Kilometer messende, nahezu kreisrunde Flecken, die ebenfalls von Einschlägen herrühren. In der höheren Auflösung der SSI-Daten lassen einige von ihnen schwach erkennbare Ringstrukturen erkennen. Bei diesen als Palimpseste bezeichneten Formen handelt es sich um Einschlagkrater, deren Morphologie durch Fließvorgänge des eishaltigen Materials beinahe vollständig ausgelöscht wurde. Höchstwahrscheinlich geschah dies durch einen Einschlag, bei dem das Projektil auf eine tiefer in der Ganymedkruste gelegene flüssige oder zumindest plastische Schicht traf. Ferner sind Übergangsformen zwischen den Palimpsesten und den normalen Kratern nachzuweisen. Diese Formen zeichnen sich meist durch eine zentrale Aufwölbung in einer zentralen Vertiefung innerhalb des Kraters aus (so genannte Dom-Krater). Der Kratertrand dagegen tritt morphologisch kaum in Erscheinung und ist meist nur durch einen niedrigen, nach innen zum Kraterboden gerichteten Steilhang charakterisiert. Derartige Kraterformen sind für Einschläge in eishaltiges Material charakteristisch, bei den aus Silikaten zusammengesetzten Oberflächen der inneren Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars) und unseres Erdmondes jedoch weitgehend unbekannt.

Kraterhäufigkeitsmessungen zeigen, dass die Krater auf den Galileischen Satelliten mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den Einschlag von Asteroiden gebildet wurden mit einer bis etwa 3,3 Milliarden Jahren vor unserer Zeit ähnlich hohen,

exponentiell abfallenden und seit dieser Zeit nahezu konstant verlaufenden Einschlagsrate. Dadurch lässt sich für jeden der Galileischen Satelliten ein Kraterchronologiemodell ableiten, mit dessen Hilfe absolute Modellalter für bestimmte Oberflächengebiete aus Kraterhäufigkeitsmessungen bestimmt werden können. In diesem Modell sind die dunklen Gebiete im Durchschnitt mindestens 4,1 bis 4,2 Milliarden Jahre alt. In den gleichen Zeitraum fallen große Einschläge, welche die Furchensysteme hervorgerufen haben. Palimpseste und Domkrater innerhalb des dunklen Gebiets weisen eine Altersspanne von 4,1 bis 3,9 Milliarden Jahren auf. Die einzelnen morphologischen Einheiten der Palimpseste und Domkrater, Dome, Kraterböden und kontinuierlichen Ejekta zeigen keine Altersunterschiede untereinander. Daraus lässt sich schließen, dass beispielsweise die Dome mehr oder weniger gleichzeitig mit dem Einschlag entstanden sein müssen.

Das helle Gebiet, das gut 60 bis 65 Prozent der Oberfläche einnimmt, ist charakterisiert durch Systeme paralleler, engständiger Rillen oder grooves. Die hoch aufgelösten SSI-Daten zeigten überraschend, dass sich die bereits auf den Voyager-Daten erkennbaren parallelen Rillen in noch feinere, schmalere, engständige Rillen auflösen lassen. Ursprünglich nahm man an, diese Gebiete seien durch vulkanische Aktivität entstanden, wobei Wassereis wie Schlamm an der Oberfläche austrat und dann nach Erkalten tektonisch deformiert wurde. Die höher aufgelösten SSI-Daten bestätigten diese Ansicht dagegen nicht. Das so genannte grooved terrain stellt im Wesentlichen die alte, einstmals dichter bekraterter alte Kruste dar, die ausschließlich durch tektonische Überprägung umgewandelt wurde und aus der schließlich das helle Gebiet hervorging. Das dunkle Material hat sich hier in den Senken angesammelt. Alte, stark deformierte Krater unterstützen das Bild der tektonischen Überprägung. Gebiete mit eindeutiger vulkanischer Vergangenheit sind gegenüber der nach Analyse der Voyager-Daten vertretenen Ansicht dagegen nur in untergeordneter Zahl vorhanden. Zumindest in einem Gebiet wurden mit SSI-Daten calderen-ähnliche Formen untersucht, aus denen „Zungen“ hellen Materials, Gletschern oder auch irdischen Lavaströmen ähnlich, austraten.

Das Gelände innerhalb der hellen Einheiten ist durch Dehnungstektonik geprägt, wobei ganze Blöcke wie Dominosteine gegeneinander verkippt wurden. Andere Bereiche zeigen Anzeichen von Dehnung in Verbindung mit Scherbewegungen (so genannte Transtension), bei denen Geländeteile, ähnlich wie bei der San-Andreas-Verwerfung in Südkalifornien, mehrere Zehn oder sogar Hunderte Kilometer lateral gegeneinander verschoben wurden. Eine derartige Scherzone wurde auch beim jüngsten (sechsten) Vorbeiflug in hoher Auflösung aufgenommen, deren Daten seit Februar 2001 zur Erde übermittelt werden. Die aus digitalen Geländemodellen abgeleiteten Höhenunterschiede im hellen Gebiet liegen in der Größenordnung von etwa einem Kilometer, also vergleichbar denen im dunklen Gebiet. Andere Regionen im hellen Gebiet zeigen, ebenfalls gestützt auf Stereoauswertungen, dass möglicherweise auch Kompressionsvorgänge abgelaufen sind, bei denen Krustenbereiche angehoben wurden. Ferner ist nach unseren neueren Erkenntnissen nicht auszuschließen, dass im dunklen Gebiet lokal auch neues Material in Zusammenhang mit tektonischen Deformationen aus der Tiefe gefördert, oder zumindest nach oben gedrückt wurde. Durch Altersdatierungen mit Einschlagskraterhäufigkeiten konnten wir ableiten, dass sich das helle Gebiet über einen größeren Zeitraum zwischen etwa 4 und 3,6 Milliarden Jahren gebildet hat.

Die geologische Geschichte Ganymeds lässt sich grob in folgende Abschnitte einteilen: (1) Das alte, dunkle Gebiet bildete sich vor mindestens 4 bis 4,1 Milliarden Jahren während einer Periode heftigen Meteoritenbombardements, vorwiegend verursacht durch Asteroiden. Dabei entstanden Multiringbecken, die heute nur noch in Form mehr oder weniger stark abgetragener, konzentrischer Furchensysteme vorhanden sind. (2) Ältere tektonische Spannungsrichtungen, die möglicherweise aus der Zeit datieren, in der die ursprünglich schnellere Ganymedrotation bis zum Erreichen einer zur Umlaufzeit synchronen Rotationsdauer abgebremst wurde, wurden wahrscheinlich durch größere Einschläge reaktiviert. (3) Eine Vergrößerung des Ganymedradius, höchstwahrscheinlich durch eine Phasenänderung im Eismantel, führte zur Bildung des hellen grooved terrain. Der Prozess endete etwa vor 3,6 Milliarden Jahren. (4) In den dunklen und hellen Gebieten waren Abtragungsvorgänge wirksam, wobei die leichter flüchtigen Bestandteile

(Wassereis) verdampften und einen Rückstand aus dunkleren, weniger flüchtigen Bestandteilen hinterließen. (5) Jüngste Bildungen der Ganymed-Oberfläche sind die hellen Strahlenkrater, deren größte durchaus noch zwei bis drei Milliarden Jahre alt sein können. Sie erscheinen weitgehend unverändert. Abtragungsvorgänge sind somit wohl eher auf die Zeit vor mehr als drei Milliarden Jahre begrenzt. Heute wird die Ganymedoberfläche lediglich durch gelegentliche Einschläge von Asteroiden und Kometen sowie durch Mikrometeoriten-Bombardement verändert.

Callisto

Callisto ist der äußerste der vier großen Galileischen Jupitersatelliten und umkreist den Zentralplaneten in einer Entfernung von 1,8 Mio. Kilometer in etwa 16 Tagen. Dieser Satellit ist mit einem Durchmesser von 4.817 Kilometer beinahe so groß wie der innerste Planet Merkur (4.880 Kilometer). Bereits vor den Voyager-Vorbeiflügen 1979 war bekannt, dass auf seiner Oberfläche wie bei Ganymed Wassereis vorhanden sein muss. Die relativ niedrige Albedo deutet ferner darauf hin, dass noch andere Stoffe, z. B. Silikate, vorhanden sind. Auf den Voyager-Aufnahmen sah man eine mehr oder weniger einheitliche, geologisch anscheinend kaum differenzierte Oberfläche, die im Wesentlichen durch eine hohe Kraterdichte geprägt ist. Daraus lässt sich auf ein Alter der Oberfläche von mindestens vier Milliarden Jahren schließen, ähnlich wie in den dicht bekraterten Hochländern auf dem Erdmond. Hauptkennzeichen der Callisto-Oberfläche sind Krater unterschiedlicher Formen, ähnlich denen, die auf Ganymed zu finden sind. Ein weiteres Charakteristikum auf Callisto sind große Einschlagsbecken mit Durchmessern von mehreren Tausend Kilometern, anders aber als beispielsweise vergleichbare Becken auf dem Erdmond mit einer Vielzahl von Ringen.

Die geringe geologische Vielfalt hat dazu geführt, dass Callisto teilweise als der

Abb.: Aus der Nähe gesehen ist die Oberfläche des Mondes Europa von zahllosen Bergrücken überzogen. In den braun gefärbten Gebieten ist die Oberfläche zum Teil auseinandergelassen, so dass Material aus dem Untergrund nach oben dringen konnte.

„langweiligste“ der vier Galileischen Satelliten angesehen wurde. Dieser Eindruck täuscht allerdings – denn es ist gerade dieser Unterschied zu seinen geologisch und tektonisch weiter entwickelten Nachbarn Ganymed und Europa, der Callisto so interessant macht: Seine Oberfläche weist am weitesten in die Frühgeschichte des Jupitersystems zurück, und es haben sich Strukturen erhalten, die auf den anderen beiden Monden längst ausgelöscht sind, wie z.B. die Ringbecken. Außerdem haben die neuen Bilddaten der SSI-Kamera an Bord der Galileo-sonde neue, unerwartete Erkenntnisse über geologische Prozesse auf der Callisto-Oberfläche erbracht.

Die Galileo-sonde flog während der nominellen Mission drei Mal nahe an Callisto vorbei und nahm dabei Bilddaten mit maximal 30 Metern pro Bildpunkt auf. Diese ersten Bilddaten brachten bereits eine Überraschung: Die hohe, auf den Voyager-Bilddaten zu sehende Kraterdichte setzt sich nicht kontinuierlich zu den kleineren Kratern (unter einem Kilometer Durchmesser) fort. Außerdem erscheint die Oberfläche bei hoher Auflösung sehr heterogen: Neben ausgeprägten hellen, topographisch höher gelegenen Bereichen, die oftmals stark verwittert erscheinen und eine so genannte „Honigwabensstruktur“ aufweisen, erscheinen andere Bereiche der Oberfläche von einer dunklen, meist glatten, möglicherweise sehr feinkörnigen Schicht überzogen. Dazu finden sich entlang von Steilhängen Anzeichen von Hangabtrag. Bei hoher räumlicher Auflösung sind Abtragungsvorgänge der dominierende geologische Prozess auf Callisto.

Bei den ersten drei Vorbeiflügen konnte nicht geklärt werden, ob es in der Vergangenheit auf Callisto Vulkanismus gegeben hat. Deshalb wurden zwei weitere Vorbeiflüge (C20, C21) während der Galileo Europa Mission genutzt, bei denen Bilddaten mit teilweise noch höherer Auflösung (bis 15 Meter pro Bildpunkt) aufgenommen wurden. Auch diese Daten erbrachten neue überraschende Erkenntnisse. So erwies sich ein helles Gebiet, das in Voyager-Bildern noch glatt wirkte, als ausgesprochen rau, und die These seiner möglichen vulkanischen Entstehung musste aufgegeben werden. Andere Bilder zeigen – abweichend von allen

Daten aus der nominellen Mission und daher völlig überraschend – eine große Anzahl kleiner Einschlagskrater. Dies legt den Schluss nahe, dass die Abtragungsvorgänge, die anderswo die kleineren Krater auslöschten, nicht überall auf der Callisto-Oberfläche gleich effektiv waren.

Der Verlauf der geologischen Geschichte Callistos lässt sich folgendermaßen kurz beschreiben: (1) In einer Zeit heftigen Meteoritenbombardements bildeten sich die meisten Krater auf Callisto und viele Multiringbecken, die bis auf einige wenige heute stark abgetragen erscheinen. (2) Tektonische Schwächezonen entstanden vermutlich durch Gezeitenwirkungen in der Frühzeit, ähnlich wie bei Ganymed bei der Abbremsung der ursprünglichen, schnelleren Rotation bis zum Erreichen einer gebundenen Rotationsperiode, und wurden durch die vielen Einschläge immer wieder reaktiviert. (3) Vulkanische Aktivität in Callistos Vergangenheit kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber nicht eindeutig nachzuweisen. (4) Nach der Entstehung der großen Becken nahm die Einschlagsrate stark ab. (5) Jüngere Strahlenkrater von etwa 3 Milliarden Jahren und weniger weisen kaum Erosionserscheinungen auf, Abtragungsvorgänge und Erosionsprozesse waren daher vorwiegend auf die Callisto-Frühzeit beschränkt. Gegenwärtig verändern lediglich gelegentliche Einschläge und Mikrometeoritenbombardement das Bild der Callisto-Oberfläche.

Europa

Europa ist mit 3.121 Kilometer Durchmesser der kleinste der Galileischen Monde, doch zeichnen diesen Mond ein paar Besonderheiten aus, die ihn zu einem der interessantesten Körper im Sonnensystem machen. Die Europa-Umlaufbahn um Jupiter befindet sich zwischen Io und Ganymed; und zwischen diesen beiden Monden liegt Europa auch in Bezug auf die geologische Aktivität der Oberfläche. Es gibt nicht diesen gewaltigen Vulkanismus wie auf Io, aber auch nicht die zahlreichen, auf eine alte Oberfläche hindeutenden Einschlagskrater wie auf Ganymed. Die europäische Oberfläche wird dafür von zwei sehr verschiedenartigen geologischen Strukturen dominiert, nämlich von Bergrücken und von sogenannten „Chaos-Gebieten“, in denen Krustenplatten auseinandergelassen und auseinandergetrieben sind. Die Bergrücken, die

häufig in Form von langgezogenen, parallel angeordneten Doppelberggrücken auftreten, wurden erst von Galileo entdeckt. Ihre Entstehung ist bislang umstritten; einige Wissenschaftlergruppen favorisieren eine „kryo-vulkanische“ Entstehung, bei der Untergrundeis oder „Matsch“ entlang von langen Rissen in der Kruste nach oben gefördert wurde und sich links und rechts der Störung abgelagert hat. Völlig andere Entstehungsthesen basieren auf tektonischen Vorgängen; entlang der langen Störung wird die Oberfläche nach oben gebogen, so dass die links und rechts hochgedrückten ursprünglichen Krustenteile die Doppelberggrücken formen.

Die „Chaos-Gebiete“ sind zum größten Teil jünger als die Berggrücken. Teile der älteren Kruste scheinen hier einfach verschwunden und durch eine jüngere, sehr hügelige Oberfläche ersetzt worden zu sein, während andere Teile noch als isolierte, abgedriftete und teilweise umgekippte Schollen in der umgebenden Matrix festgefroren erscheinen. Wie können solche Strukturen entstehen, was muss im Untergrund ablaufen? Es scheint sicher, dass das Untergrundeis auf Europa zum Zeitpunkt der Entstehung der Chaosgebiete „warm“ und weich gewesen sein muss. Noch weiter geht die Hypothese, dass der Untergrund vielleicht einmal flüssig war oder es vielleicht noch ist.

Damit kommen wir zum wichtigsten Aspekt der Europa-Forschung, nämlich der Möglichkeit, dass sich unter der -140 °C kalten, festen, spröden, oberen Eiskruste ein Ozean aus flüssigem Salzwasser verbergen könnte, der über 100 Kilometer tief sein und die zwei- bis dreifache Wassermenge aller irdischen Ozeane enthalten könnte. Dies wäre das erste Mal, dass außerhalb unserer Erde eine größere zusammenhängende Wasseransammlung in Zusammenhang mit einer festen Oberfläche entdeckt würde. Die Bedeutung eines solchen Fundes ginge weit über planetologische Fragestellungen hinaus, tatsächlich hätte er sogar eine große philosophische Bedeutung für das Selbstverständnis der Menschen überhaupt. Von unserer Erde wissen wir, dass der Ozean Leben trägt. Würde woanders im Sonnensystem ein Ozean entdeckt, stellt sich auch dort die Frage nach möglichen Lebensformen. Und wäre der Jupitermond Europa tatsächlich ein zwei-

ter Ort im Sonnensystem, auf dem Leben existiert, so könnte man sofort schlussfolgern, dass Leben im gesamten Universum sehr verbreitet sein muss. Denn unterschiedlicher als auf der Erde und auf Europa können die Bedingungen für Ozeane und Leben wohl kaum sein – hier (auf der Erde) ein „Oberflächen-Ozean“, der permanent dem Sonnenlicht unter „angenehmen“ Bedingungen ausgesetzt ist; dort (auf Europa) eine Wassermasse, die unter einem dicken Eispanzer von jeglichem Sonnenlicht abgeschirmt wird. Doch zurück zum heutigen Wissensstand – noch ist nicht einmal vollständig sicher, ob der Europa-Ozean überhaupt existiert. Galileo hat jedoch vor allem im Rahmen der GEM eine Fülle von Daten geliefert, die darauf hindeuten, dass es ihn wahrscheinlich gibt.

Ein interessanter Aspekt, der mit Hilfe der Galileo-Daten untersucht werden konnte, ist die so genannte „nicht-synchrone Rotation“ der oberen Kruste. Wie unser Erdmond, von dem wir immer nur die „Vorderseite“ sehen können, rotieren auch die Galileischen Monde gebunden. Auch sie haben also eine dem Planeten zugewandte Seite, eine (Jupiter) abgewandte Seite, eine „vorausellende“ und eine „nachfolgende“ Seite. Bei Europa wäre es aber theoretisch denkbar, dass die oberste Kruste über einem Ozean doch ein klein wenig schneller rotiert als Mantel und Kern. Sollte eine solche „Extrarunde“ beispielsweise in einem Zeitraum von 10.000 Jahren geschafft werden, so würde das bedeuten, dass das Innere Europas in diesem Zeitraum eine Million Eigenumdrehungen durchführen würde, Europa ebenfalls eine Million Mal Jupiter umkreisen würde, die Kruste sich jedoch 1.000.001 Mal gedreht hätte. Durch Vergleich mit Voyagerbildern wurde versucht, eine solche Periode zu ermitteln, doch ohne Erfolg. Dies bedeutet, dass die nicht-synchrone Rotation langsamer als 10.000 Jahre sein muss – wenn es sie denn überhaupt gibt. Hinweise darauf wurden in globalen Liniensystemen auf der Europa-Oberfläche gesehen, die auf eine Korrelation zwischen Alter und Ausrichtung hindeuten und sehr gut mit der nicht-synchronen Rotation erklärt werden könnten. Ob es hierfür aber noch andere Erklärungen gibt, bleibt offen. Der bisherige Wissensstand in Bezug auf die nicht-



synchrone Rotation der Kruste ist also konsistent mit der Ozean-Hypothese, liefert aber keinen zwingenden Beweis.

Ein anderer Hinweis auf einen Ozean wäre die Entdeckung von geysir-artigen Eruptionsfontänen. Beim E19-Vorbeiflug wurde daher der Horizont im Gegenlicht fotografiert in der Hoffnung, eventuell vorwärts gestreutes Licht von kleinsten Partikeln entdecken zu können, doch leider ohne Erfolg. Mehr Einblicke ins Innere erlaubten Untersuchungen der Kratermorphologien, und hier bietet Europa Überraschendes. Kleinere Krater bis etwa 25 Kilometer Durchmesser wie der bekannte Pwyll ähneln Kratern auf den anderen Galileischen Monden mit der Ausnahme, dass sie erheblich flacher sind. Ist der Wärmefluss von innen etwa groß genug, das Eis hier „weich“ werden zu lassen, so dass Krater auf Europa nach einiger Zeit „in sich zusammensinken“ können? Größere Impaktstrukturen wie Tyre und Callanish zeigen überhaupt keine Ähnlichkeit mehr mit „konventionellen“ Kratern. Hier hat man eher den Eindruck, auf ein konzentrisches Bruchmuster zu blicken, das ein ins Wasser geworfener Stein auf darüber liegendem dünnen Eis hinterlässt. Vielleicht wurde hier die Eiskruste durchschlagen? In diesem Fall hätte zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Strukturen – vor über 1 Milliarde Jahren – der Ozean existiert. Das bedeutet aber nicht, dass er auch noch heute vorhanden sein muss.

Wiederum eine andere Sichtweise liefern die Daten des Spektrometers NIMS. Das Spektrum von Wassereis besitzt charakteristische Absorptionsbanden bei Lichtwellenlängen von 1,5 μm und 2,0 μm . Dadurch konnte schon vor 30 Jahren von der Erde aus das Vorhandensein von Wassereis auf Europa, Ganymed und Callisto nachgewiesen werden. Eine detaillierte Auswertung der Form dieser Absorptionen in den NIMS-Europa-Daten zeigte jedoch, dass sie in den dunkleren Oberflächenregionen unsymmetrisch sind, was mit Wassereis nicht so recht zusammenpasst. Als Alternative wurden so genannte Evaporite als Oberflächenmaterial dieser Gebiete vorgeschlagen. In Frage kommen vor allem Magnesiumsulfat und Natriumcarbonat, beide mit vielen angelagerten Wassermolekülen. Diese

Salze könnten aus einem salzhaltigen Ozean stammen; an der Oberfläche angelangt, entkam das leichtflüchtigere Wasser zum großen Teil, und die Evaporite blieben zurück. Diese These ist jedoch umstritten. So gibt es Stimmen, die einwenden, dass die asymmetrischen Absorptionsbanden auch auf physikalische Ursachen zurückführbar sein könnten, insbesondere auf Grund der Tatsache, dass eine weitere Absorption bei 1,25 μm nicht so recht zu den Salzen passt. Andere Einwände machen geltend, dass Salze weiß sind, die dunklen Linienstrukturen auf Europa jedoch rötlich. Schließlich stellt sich auch die Frage nach der „Haltbarkeit“ der vorgeschlagenen Evaporite – auf der Erde jedenfalls würden diese Salze schon innerhalb weniger Tage ihre angelagerten Wassermoleküle verlieren. Doch ist es auf Europa vielleicht kalt genug. Auch hier also die Schlussfolgerung: Die NIMS-Daten erscheinen konsistent mit einem Ozean – vielleicht ist er für ihre korrekte Interpretation sogar nötig. Doch noch ist dies umstritten und der Ozean noch nicht eindeutig nachgewiesen.

Den bislang stärksten Hinweis auf einen Ozean lieferte das Magnetometer-Experiment. Bei den nahen Vorbeifügen wurde in unmittelbarer Europa-Nähe eine Veränderung des umgebenden Jupiter-Magnetfeldes gemessen. Diese lässt sich nach Angaben der beteiligten Wissenschaftler nur so interpretieren, dass Europa ein vom Jupiterfeld induziertes Magnetfeld besitzt, das von einer „elektrisch leitfähigen Schicht in Oberflächennähe“ erzeugt wird. „Leitfähige Schicht in Oberflächennähe“ ...; kosmochemisch kommt hier eigentlich nur Salzwasser in Betracht. Wo liegt hier der Haken? Eine große Überraschung lieferten die Magnetometermessungen an Callisto. Die Daten passten wunderschön – viel besser noch als bei Europa – zu einem Salzwasser-Ozean. Aber unter der alten, geologisch völlig toten Oberfläche des im Inneren möglicherweise sogar gar nicht richtig differenzierten Callisto hatte niemand auch nur im Entferntesten mit einem Ozean gerechnet. Sollten Ozeane etwas „Normales“ bei den Galileischen Eismonden sein? Ist es denkbar, dass ein unterirdischer Ozean keinerlei Spuren an der Oberfläche hinterlässt? Oder gibt es für die Messungen eine andere Erklärungsmöglichkeit, an die noch niemand gedacht hat? Und wie ist die Lage bei

Ganymed? Auch bei Ganymed weisen jüngste Magnetometer-Messungen auf einen möglichen Ozean hin. Hier ist die Dateninterpretation sehr erschwert, da Ganymed ein eigenes Dipol-Magnetfeld besitzt, welches viel stärker als das induzierte Feld ist und dieses überlagert. Dieser Ozean wäre aber vielleicht nur wenige Kilometer dick und würde sich in 150 Kilometer Tiefe befinden – zu tief, um merkliche Spuren an der Oberfläche zu hinterlassen.

Ausblick: Europa Orbiter, „U-Boot“, Cassini

Es bleibt also zunächst das Fazit, dass ein Ozean unter der Europa-Oberfläche gut verträglich mit den Galileo-Daten ist und dass sogar zwei weitere Monde – Ganymed und Callisto – Ozeane besitzen könnten. Doch wie bekommen wir endgültige Klarheit? Des Rätsels Lösung könnte die Europa-Orbiter-Mission „EOM“ bringen. EOM ist eine unbemannte Raumsonde, die zur Zeit von der NASA geplant wird und vielleicht im Jahr 2008 auf die Reise gehen kann. Nach etwa dreijährigem Flug würde die Sonde zunächst wie Galileo in einen Jupiterorbit einschwenken und dort etwa anderthalb Jahre verbleiben. Gravity-Assist-Manöver an Ganymed und Callisto und später an Europa würden die EOM-Flugbahn der Europa-Umlaufbahn immer mehr annähern, bis zuletzt dann von einer 6:5+ Bahnresonanz aus (auf 6 Europa-Umläufe um Jupiter kommen fünf EOM-Umläufe) in eine polare Europa-Umlaufbahn in etwa 200 Kilometer Höhe über der Oberfläche eingeschwenkt werden kann. Die anschließende Europa-Mission dauert etwa einen Monat bzw. ≈ 300 EOM-Umkreisungen um Europa bzw. etwa 8,5 Europa-Umläufe um Jupiter, bevor der „Strahlentod“ die Sonde ereilt. In dieser Zeit sollen mit Kameras die Oberfläche ausführlich kartiert, mit einem Höhenmesser die Topographie bestimmt und mit einem Magnetometer das (induzierte) Magnetfeld ausführlich vermessen werden.

Wie aber kann der Ozean eindeutig nachgewiesen werden? Am besten dürfte das durch Vermessung des Tidenhubs möglich sein. Aus Modellrechnungen wird vorhergesagt, dass sich die europäische Kruste im Verlauf eines „Europa-Tages“ (85,2 Stunden) um etwa 20 bis 30

Die Galileischen Monde im Überblick

Mond	Io	Europa	Ganymed	Callisto
Mittlerer Abstand zur Sonne	779 Mio. km	779 Mio. km	779 Mio. km	779 Mio. km
Abstand zum Jupiter*	421.600 km	670.900 km	1.070.000 km	1.883.000 km
Umlaufzeit und Rotation**	1 d 18 h 27 min	3 d 13 h 13 min	7 d 3 h 43 min	16 d 16 h 32 min
Durchmesser	3.650 km	3.121 km	5.268 km	4.817 km
Masse	0,90 x 10 ²³ kg	0,48 x 10 ²³ kg	1,47 x 10 ²³ kg	1,08 x 10 ²³ kg
Mittlere Dichte***	3,57 g/cm ³	2,97 g/cm ³	1,94 g/cm ³	1,86 g/cm ³
Schwerebeschleunigung an der Oberfläche****	0,18 g	0,13 g	0,14 g	0,13 g
Oberflächentemperatur	-190 bis +1.800°C	-190 bis -140°C	-170 bis -120°C	-200 bis -110°C
Häufige Oberflächenmaterialien	Schwefeldioxid, Silikate, Schwefelmodifikationen	Wassereis, Evaporite?, Schwefelsäure??, dunkles Material?	Wassereis (an den Polkappen auch als Frost), dunkles Material	dunkles Material (oben aufliegend), Wassereis (Untergrund)

* Angegeben ist die große Bahnhalbachse, d.h. die mittlere Entfernung Jupiterzentrum – Mondzentrum.

** d = Tage; h = Stunden; min = Minuten.

*** Flüssiges Wasser hat ein Gramm pro Kubikzentimeter (1 g/cm³).

**** 1,0 g entspricht der Schwerebeschleunigung auf der Erde, d.i. 9,81 m/s². Wenn Sie Ihr Gewicht auf den Galileischen Monden ausrechnen wollen, multiplizieren Sie einfach die angegebene Zahl mit Ihrem „Erd-Gewicht“. Um Ihr Gewicht in der oberen Jupiteratmosphäre am Äquator zu berechnen, müssen Sie Ihr Erdgewicht mit 2,3 multiplizieren. Ihr „Jupiter-Polarregion-Gewicht“ erhalten Sie durch Multiplikation mit 2,85.

m hebt und senkt, wenn ein Ozean darunter liegt. Sollte Europa aber durchgefroren sein, dürfte der Tidenhub weniger als einen Meter betragen. Mit Hilfe des Laser-Altimeters (Höhenmessers) von „QUEST“ wäre es möglich, diesen Unterschied zu messen.

QUEST („Quest for European Seas and Tides“) ist ein wissenschaftliches Experimentpaket, das von der John Hopkins University in Laurel (US-Bundesstaat Maryland) und der Arizona State University in Tempe (Arizona) für den Europa-Orbiter vorgeschlagen wurde. QUEST besteht aus einer Tele- und einer Weitwinkelkamera, dem Laser-Altimeter und einem Magnetometer. Das DLR in Berlin ist durch die Bereitstellung von Teilen der Hardware – Optiken, Filter und Gehäuse für die Kameras – sowie wissenschaftlich an QUEST beteiligt. Sollte QUEST von der NASA aus den zahlreichen, konkurrierenden Vorschlägen ausgewählt werden, könnte das DLR auch für die Europa-Orbiter-Mission einen entscheidenden Beitrag beisteuern.

Und wenn der Europa-Orbiter einen Ozean finden sollte, dann besteht natürlich großes Interesse daran, herauszufinden, wie es denn im Innern von Europa

aussieht und ob es dort biologische Aktivitäten gibt. Im Prinzip könnte eine Art U-Boot durch die Eiskruste von Europa hindurch geschmolzen werden und im Ozean selbstständig auf Erkundungsfahrt gehen. Eine solche Mission dürfte aber kaum vor 2020 realisierbar sein und enthält höchst komplexe Missionsanforderungen. So ist es schon wegen der Signallaufzeiten (0,3 Mio. km/s) praktisch unmöglich, ein U-Boot aus 770 Mio. Kilometer Distanz fernzusteuern. Auch ist es nicht einfach, sich durch kilometerdicke Eisschichten durchzuschmelzen, ganz zu schweigen von der Datenverbindung nach oben. Schließlich muss sehr darauf geachtet werden, dass nicht von der Erde mitgeführte Bakterien den Ozean verunreinigen, denn man will ja gerade wissen, ob dieser steril ist oder eigenständig Leben hervorbringen konnte.

Kehren wir deshalb in die heutige Zeit und zum „kosmischen Rendezvous“ der beiden Sonden Galileo und Cassini zurück. Während Galileo sich langsam „aufs Altenteil“ zurückzieht und allenfalls noch ein, vielleicht zwei Jahre lang Daten senden wird, bereitet sich Cassini nach seinem Vorbeiflug am Jupiter auf seine eigentliche Bestimmung vor. Am frühen

Morgen des 1. Juli 2004 soll das Bremstriebwerk für anderthalb Stunden gezündet werden und Cassini in eine Umlaufbahn um den Ringplaneten Saturn einschwenken. Saturn ist der zweitgrößte Planet unseres Sonnensystems und umkreist die Sonne in etwa doppelter Jupiterentfernung. Nach gegenwärtiger Planung kann dann im November 2004 die mitgeführte europäische Eintauchsonde „Huygens“ abgetrennt werden. Ihr Ziel wird der größte Saturnmond Titan sein, der als einziger Mond überhaupt eine nennenswerte Atmosphäre besitzt. Anschließend wird sich Cassini dreieinhalb Jahre lang intensiv der Erkundung von Saturn und seinen Monden widmen. Die neuen Erkenntnisse dürften in ihrem Mix an Faszination, Erwartetem, Überraschung und Unverständlichem den Galileo-Daten aus dem Jupitersystem voraussichtlich in nichts nachstehen.

Prof. Dr. Gerhard Neukum (Geschäftsführender Direktor des DLR-Instituts), Tilmann Denk, Dr. Bernd Giese, Peter Schuster und Roland Wagner, alle vom DLR-Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Berlin.

E-Mail: www.dlr.de/Galileo und www.dlr.de/Cassini ◀