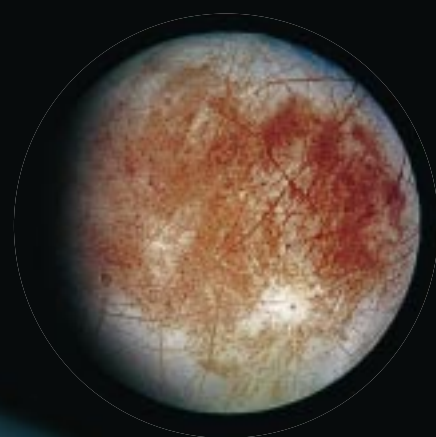
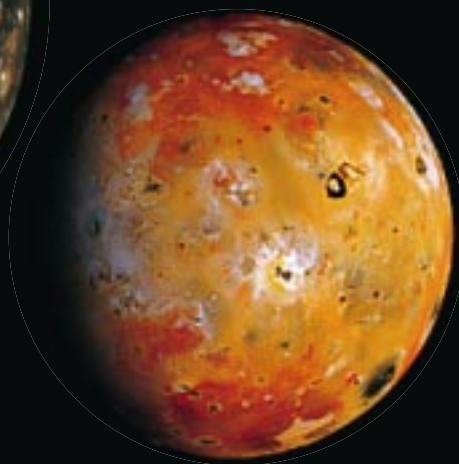
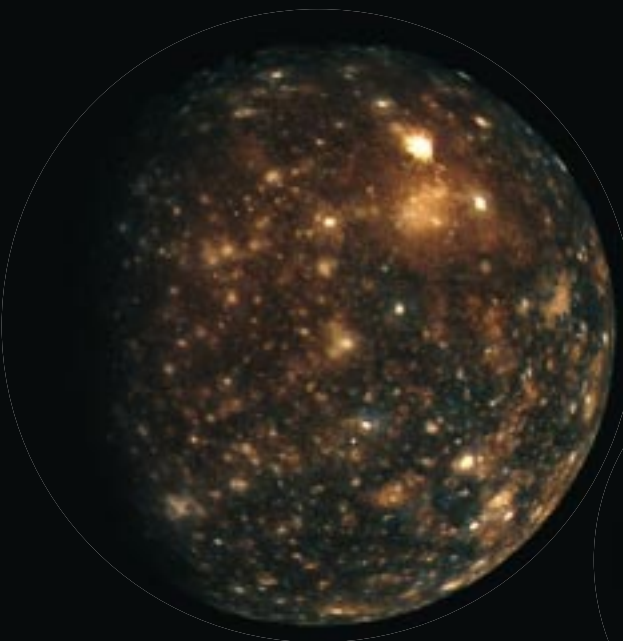


# FORSCHUNG



*In dieser Fotomontage sind die vier Jupiter-Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto in korrekten Größenverhältnissen abgebildet. Der Große Rote Fleck in der Atmosphäre Jupiters (unten) ist ein gigantischer Sturmwirbel, dessen Durchmesser größer als die Erde ist.*

*(Bilder: NASA/JPL/RPIF/DLR; Montage: DLR)*

# FEUER UND EIS

Ergebnisse der Galileo-Mission zum Jupiter-System · Von Gerhard Neukum



Die seit 1989 andauernde NASA-Mission Galileo zu Jupiter, dem größten Planeten des Sonnensystems, und seinen Monden lieferte mit 17 Experimenten Daten von unschätzbarem wissenschaftlichen Wert. Bereits auf seiner sechsjährigen Reise durch das innere Sonnensystem konnte der Orbiter en passant wertvolle Daten sammeln. Aber vor allem seit dem 7. Dezember 1995, als Galileo und die zuvor auf eine ballistische Flugbahn gebrachte Atmosphären-Eintauchkapsel ihr Hauptziel erreichten, übermittelt der künstliche Jupitersatellit faszinierende Aufnahmen des vulkanisch aktiven Mondes Io und der eisigen Trabanten Europa, Ganymed und Callisto mit bis zu elf Meter Auflösung pro Bildpunkt. Zum Jahreswechsel 1997/98 endete die nominale Mission, die nun in eine zweijährige Verlängerung mündet.

Neben der 1997 gestarteten Mission Cassini/Huygens stellt Galileo das bisher vielseitigste, umfassendste und komplizierteste unbemannte Raumfahrtunternehmen dar. Galileo sollte über einen Zeitraum von zwei Jahren das Jupitersystem erforschen. Die Aufnahmesysteme SSI (Solid State Imaging-Experiment – eine hochauflösende Multispektralkamera für das sichtbare Licht und nahe Infrarot) – und NIMS (Near Infrared Mapping Spectrometer) widmeten sich vor allem Struktur und Dynamik der Jupiteratmosphäre, der Bestimmung von Oberflächenformen auf den Jupitersatelliten Io, Europa, Ganymed und Callisto – den nach ihrem Entdecker Galileo Galilei benannten „Galileischen Monden“ – und deren geologischer Entwicklung. Die SSI-Kamera lieferte dabei eine wesentlich höhere, zum Teil über hundertmal bessere räumliche Auflösung als die Voyager-Sonden 1979. Durch Multispektral-Bilddaten sollten Erkenntnisse über die chemische Zusammensetzung der Jupiteratmosphäre und die Mineralogie des Oberflächenmaterials der Jupitermonde gewonnen werden.

**Vier Milliarden Kilometer durch das innere Sonnensystem**

Wegen des Challenger-Unglücks 1986 verzögerte sich der Start der Galileo-Sonde um mehrere Jahre. Erst am 18. Oktober 1989 wurde Galileo durch das Shuttle Atlantis in eine Erdumlaufbahn gebracht. Das Jupitersystem konnte nun nur noch auf einer sehr viel längeren Flugbahn erreicht werden.

Ein Venus- und zwei Erde-Mond-Vorbeiflüge mußten der Sonde den nötigen Schwung verleihen. Durch diese verlängerte Flugbahn ergaben sich jedoch zusätzliche Möglichkeiten, eine Reihe wissenschaftlicher Experimente durchzuführen. So untersuchte die Kamera die vertikalen Strukturen und die Dynamik der oberen Venusatmosphäre; bei den beiden Erde-Mond-

Vorbeiflügen konnte fast die gesamte Mondoberfläche erstmals in mehreren Farbfiltern aufgenommen werden. Ein „first“ waren auch zwei Nahvorbeiflüge an Asteroiden: 1991 an »951 Gaspra« und 1993 an »243 Ida«. Auf den hochauflösenden Aufnahmen von Ida wurde überraschend erstmals ein kleiner Mond mit etwa 1,6 Kilometer Durchmesser entdeckt.

Ein weiterer Meilenstein war im Juli 1994 die direkte Beobachtung der Einschläge von Fragmenten des Kometen Shoemaker-Levy 9 in die Südhalbkugel Jupiters. Schließlich sprengte Galileo ein halbes Jahr vor der Ankunft eine Atmosphären-Eintauchkapsel ab, die auf einer ballistischen Bahn zum Jupiter flog und am 7. Dezember 1995 in dessen Wolkenhülle eintauchte, von wo

sie für knapp 60 Minuten Daten übermittelte.

Leider traten trotz dieser Erfolge Schwierigkeiten auf, die den Missionsverlauf und die geplante Datenausbeute wesentlich beeinflussen sollten und eine Neuprogrammierung und Neugestaltung des Ablaufs des Kamera-Experimentes erforderlich machten. Die Hauptantenne hatte sich nicht wie geplant geöffnet. Dadurch blieb zur Datenübertragung lediglich die kleinere, wesentlich weniger leistungsfähige Antenne. Ferner arbeitete das Bandgerät zur Datenspeicherung an Bord der Sonde kurz vor der Ankunft am Jupiter fehlerhaft.

Seit dem 8. Dezember 1995 befindet sich Galileo auf einer exzentrischen





Bahn um Jupiter. Während insgesamt elf Umrundungen wurde die Sonde gezielt viermal am größten Mond Ganymed sowie je dreimal an Europa und Callisto in geringer Entfernung vorbeigelenkt, wobei Bilddaten von bis zu elf Meter Auflösung pro Bildpunkt (Pixel) gewonnen wurden. Obwohl wegen der genannten technischen Schwierigkeiten bei weitem nicht die geplante Bildausbeute erzielt werden konnte, gelang es unter Ausnutzung aller Möglichkeiten der Aufnahmetechnik und der Datenkompression, wenigstens zwölf Prozent des geplanten Bilddatenumfanges zu erreichen.

Nach dem 6. November 1997 endete mit dem letzten Vorbeiflug an Europa die nominale Galileo-Mission. Noch vor dem Einschwenken der Sonde in die

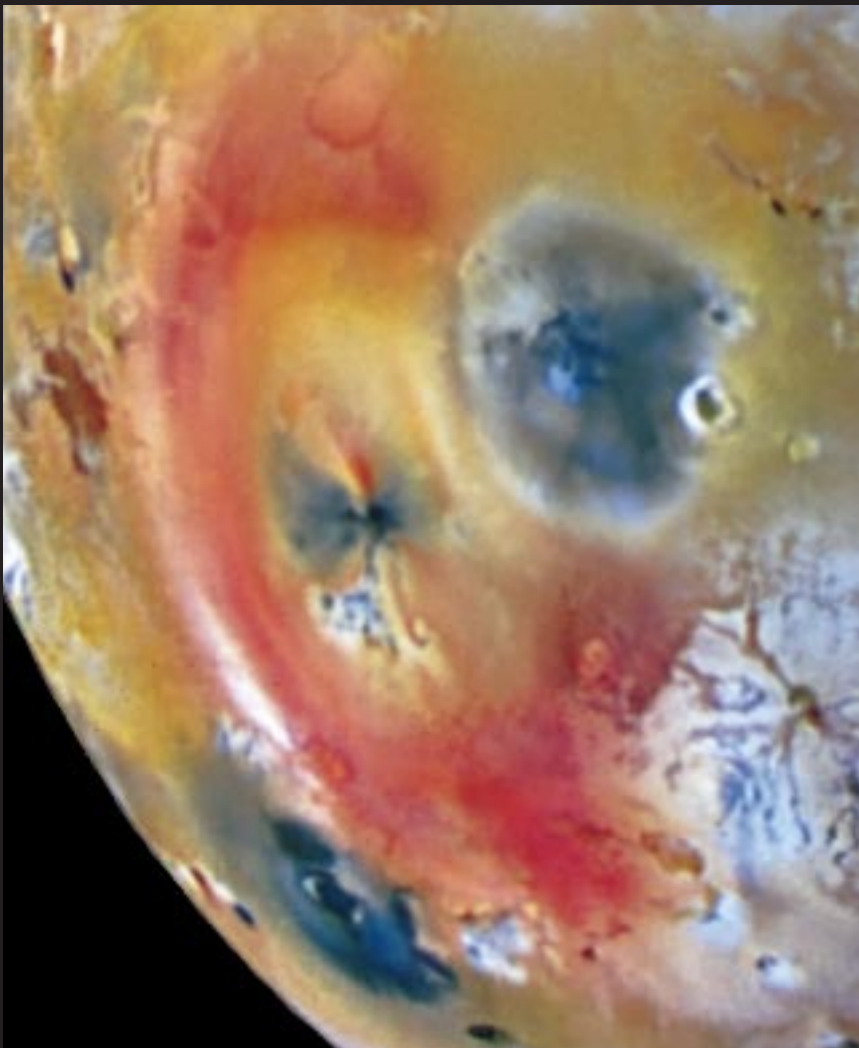
Jupiterbahn war jedoch bereits erkannt worden, daß durch die hohe Präzision der Bahnführung Treibstoff gespart werden konnte. Bald wurde eine Verlängerung der Mission um weitere zwei Jahre diskutiert – die mittlerweile begonnen hat. Der von Voyager und Galileo nicht ausreichend abgedeckte Mond Europa wird Hauptziel dieser „Galileo Europa Mission (GEM)“ genannten dritten Phase des Fluges sein. Acht Nahvorbeiflüge an Europa sollen die Bilddatenbasis dieses Mondes wesentlich erweitern. Daran schließen sich vier weitere gezielte Vorbeiflüge an Callisto an. Die letzten beiden Vorbeiflüge haben Io zum Ziel mit Bilddaten von wenigen Metern Auflösung pro Bildpunkt. Am 31. Januar 2000 wird die Galileo-Mission endgültig beendet sein.

## Io – der Mond der Vulkane

Io, der innerste der Galileischen Monde, ist der vulkanisch aktivste Körper im gesamten Sonnensystem. Himmelskörper von der Größe Io – vergleichbar mit unserem Erdmond – würden an anderer Position im Sonnensystem bereits in der Frühzeit ihrer Entwicklung auskühlen und vollkommen erstarren. Doch die enorme Schwerkraft Jupiters läßt in Io Gezeitenkräfte wirken, die den Mond in einem solchen Ausmaß verformen, daß sein Inneres durch die dabei entstehende Reibungswärme über Jahrmilliarden heiß und flüssig blieb.

Diese Gezeitenkräfte bewirken eine enorme Aufheizung im Innern des Körpers, was auch die Ursache der starken Differenzierung des verhältnismäßig kleinen Mondes ist. Denn Io weist einen recht großen metallischen Kern auf, der von einem flüssigen Mantel umgeben ist. Hieraus speist sich der permanente, aktive Vulkanismus von

Io. Ähnlich wie bei einem Dynamo sind also die Voraussetzungen gegeben, ein eigenes, aktives Magnetfeld auszubilden – das erste, das bei einem Mond nachgewiesen wurde. Wahrscheinlich bewirkt eine Kombination aus Gezeitenkräften, schneller, gebundener Rotation und der „weichen“, leicht verformbaren Konsistenz des Mondes die gemessene starke Abweichung von der „idealen“ Kugelgestalt. In Richtung Jupiters ist die Halbachse dieses „Rotationsellipsoids“ etwa zehn Kilome-



*Galileos Kamerasystem enthüllte bei zwei nur ein halbes Jahr auseinanderliegenden Vorbeiflügen dramatische Veränderungen an Ios Vulkan Pillan: Binnen dieser Zeit überdeckten Eruptionen eine Fläche größer als Bayern mit jungen vulkanischen Auswurfprodukten, zu erkennen an der großen schwarzen Fläche, die auf dem jüngeren Bild (rechts) am Nordostrand der größten Vulkanzone auf Io mit Namen Pele zu sehen ist. (Bild: NASA/JPL/RPIF/DLR)*

ter länger als die in Richtung der Bahnbewegung weisende Achse, und sogar 15 Kilometer länger als die polaren Halbachsen.

Die beiden Voyager-Missionen nahmen bei ihrem Io-Vorbeiflug mehrere hundert Bilder auf, die in der Folgezeit als Basis für die Berechnung von Kontrollnetzen dienten. Diese Netze bestehen aus einer möglichst hohen Anzahl von markanten Punkten auf der Oberfläche, deren exakte Koordinaten (Länge, Breite und Höhe) durch photogrammetrische Methoden bestimmt werden. Kontrollnetze charakterisieren die globale Figur eines Planeten und werden daher als Referenz für die Absolutanbindung von Geländemodellen der Oberfläche sowie zur Herstellung genauer, maßstäblicher Karten gebraucht. Die nun verfügbaren Galileo SSI-Bilder stellen einen unabhängigen Datensatz dar und wurden im Rahmen einer Neuberechnung des Io-Kontrollnetzes mit den Voyager-Bilddaten kombiniert. Damit konnte die Zuverlässigkeit des bis dahin bestehenden Netzes erhöht werden. Maßgeblichen Einfluß auf die erreichte Punktgenauigkeit hatte die hohe geometrische Präzision der SSI-Kamera.

Die komplizierten Wechselwirkungen der Galileischen Monde untereinander führen im Zusammenspiel mit Jupiter dazu, daß die Bahn von Io Abweichungen von einer idealen gebundenen Rotation und der dazugehörigen Kreisbahn aufweist. Diese Tatsache verursacht eine zeitlich und örtlich variable Gezeitenwirkung. So entsteht erstens ein bis zu hundert Meter hoher „Gezeitenberg“, der – die oben beschriebene „Ausbeulung“ überlagernd – über die Oberfläche wandert. Zweitens führt dies zu einer örtlich unterschiedlichen Aufheizung der Kruste und des Mantels. In welcher Tiefe aber findet diese Aufheizung nun statt? Läuft dieser Mechanismus in großer Tiefe ab, so wird sich der Wärmefluß bis zur Oberfläche vermutlich global gleichmäßig verteilt haben. Anders ist es, wenn der größte Anteil der Gezeitenenergie in einer Schicht dicht an der Oberfläche „deponiert“ wird. Dann wird dort die feste Kruste dünner sein, da sie durch die entstehende Wärme von unten abgeschmolzen wird. Durch Dichteunterschiede zwischen dem flüssigen Mantel

und der darauf schwimmenden festen Kruste äußern sich diese Zonen erhöhter Wärmeproduktion durch Höhenunterschiede an der Oberfläche. Eine exakte Bestimmung der Oberflächenform von Io stellt deshalb das empfindlichste Verfahren dar, den Mechanismus der Aufheizung und damit die grundlegende Ursache für einige Besonderheiten besser verstehen zu lernen.

Die Oberfläche von Io ist nahezu ausschließlich von vulkanischen Vorgängen geprägt, die mit der SSI-Kamera verfolgt wurden. So konnte die schwankende Zahl aktiver Vulkane genauso erfaßt werden wie die Zahl der Vulkane, die seit Voyager aktiviert wurden bzw. keine Tätigkeit mehr zeigen. Katalogisiert wurde auch die räumliche Verteilung der Vulkane – mit einer ersten Erkenntnis, daß sich die „Feuerberge“ vorwiegend in einem breiten Gürtel beiderseits des Äquators befinden. Die Vulkankegel haben gigantische Ausmaße von wohl einigen Kilometern Höhe. Die freigesetzte Energie reicht aus, vulkanische Gase und Auswurfmaterial mehrere hundert Kilometer hoch ins All zu schleudern. Das Treibgas dürfte dabei Schwefeldioxid sein; bei den Substanzen, die auf die Io-Oberfläche niederregnen, ist man dagegen noch nicht so sicher: Daß es sich um verschiedene Schwefelverbindungen handeln muß, scheint klar, aber welche dies sind, ist noch nicht gewiß. Schließlich sind die ausgeworfenen Massen so gewaltig, daß sie die Oberfläche los zwischen mehreren Millimetern und bis zu einem Zentimeter pro Jahr überdecken!

### Die Monde in multispektralem Licht betrachtet

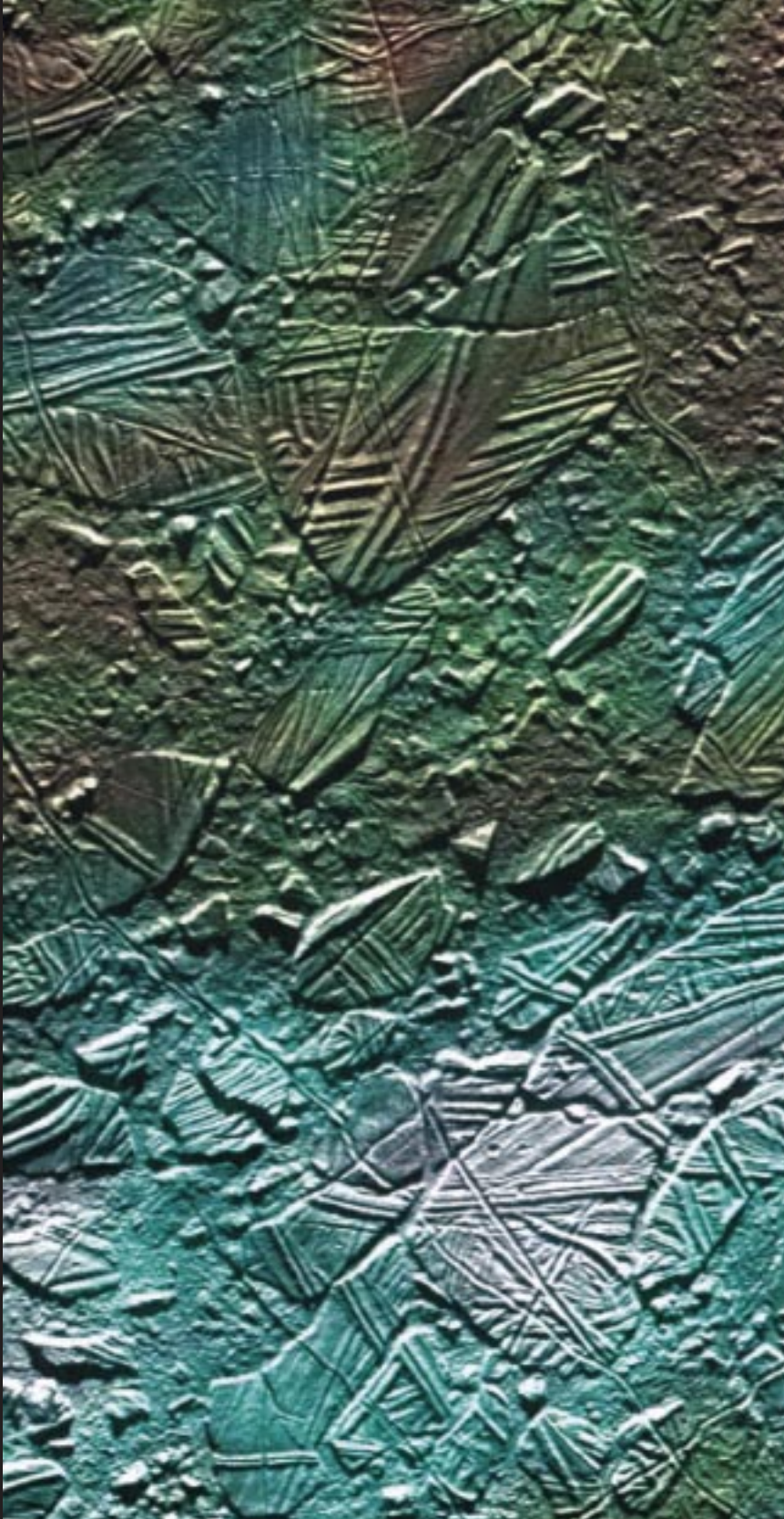
Auch die Untersuchung von Spektraldaten war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im DLR. Die SSI-Kamera an Bord von Galileo verfügt hierzu über sieben Farbfilter und ist zwischen 0,4 und 1,0 Mikrometer sensitiv. Io ist von den vier Galileischen Monden der mit Abstand farbenprächtigste; die gelben und roten Farben dürften von Schwefelverbindungen stammen. Da Schwefelspektren keine genügend guten diagnostischen Absorptionsbanden aufweisen, kann diese Vermutung allerdings mit fernerkundlichen Mitteln nicht völlig zweifelsfrei nachgewiesen

werden. Die weißen Flächen, die sich insbesondere in der Äquatorebene konzentrieren, bestehen aus Schwefeldioxid-Eis. Ihre Entstehung verdanken sie dem Vulkanismus auf Io. Die dunklen, schwarz erscheinenden „Flecken“ schließlich sind Zentren aktiver oder zur Zeit ruhender Vulkane. Die hohe Temperatur von über 1.500 Grad Celsius läßt auf ultramafischen, also sehr basischen Vulkanismus schließen, etwa wie an Vulkanen der ozeanischen Kruste auf der Erde (abgesehen vom Schwefelgehalt). Die dunklen Flecken dürften vor allem aus magnesium- und eisenreichen Silikaten bestehen.

Auf Europa, Ganymed und Callisto wird die Oberfläche von Wassereis dominiert. Vor allem die Oberfläche Europas besteht aus fast purem Wassereis, das in zwei Gruppen eingeteilt werden kann: „Infrarot-helle“ und „Infrarot-dunkle“ Gebiete. Dieser Unterschied kann auf verschiedene Korngrößen des Eises oder auf eine geringe Beimengung von anderem – möglicherweise silikathaltigem – Material zurückgeführt werden.

Auf Ganymed sind viele, auf Callisto fast alle Gebiete von einem dunklen Material bedeckt, das offensichtlich auf der Wassereiskruste liegt. Die genaue Zusammensetzung dieses dunklen Materials, das möglicherweise im gesamten äußeren Sonnensystem eine Rolle spielt, ist noch nicht bekannt. Die im Institut für Planetenerkundung ausgewerteten Daten lassen vermuten, daß mindestens zwei Komponenten eine Rolle spielen. Kandidat für eine Komponente sind Phyllosilikate wie z.B. Serpentin, für die andere kommt organisches Material in Frage, das auf bestimmten Asteroiden zu finden ist. Bei beiden Materialien dürfte während der Entstehung auch Wasser eine wichtige Rolle gespielt haben. Denkbar ist auch, daß Schwefel die Spektren beeinflusst. Vor allem für Europa erscheint dies wahrscheinlich, spuckt doch der in der Nähe kreisende Mond Io permanent Schwefel in seine Jupiterumlaufbahn, das von Europa teilweise aufgesammelt werden kann. Ansonsten dürften auch auf Europa dieselben Materialkomponenten wie auf Ganymed und Callisto vorkommen, allerdings an den meisten Stellen weit weniger konzentriert.





## Kontroverse Diskussionen um Europa

Europa ist mit nur 3.130 Kilometern Durchmesser der kleinste der vier Galileischen Monde. Die mit einer Albedo zwischen 0,6 und 0,8 sehr helle Oberfläche ist von fast reinem Wassereis bedeckt und zeigt nur wenige Einschlagskrater. Dafür sind einzelne und parallel verlaufende Bergrücken eine dominierende Oberflächenstruktur; die maximale Höhe dieser Erhebungen beträgt nur wenige hundert Meter.

An vielen Stellen sind die Bergrücken durchbrochen, von Krustenverschiebungen zerrissen oder sogar völlig von hügeligem Gelände ausgelöscht, das zum Teil an auseinandergedriftete Eisschollen im irdischen Packeis erinnert. Die mittlere Dichte liegt bei  $3 \text{ g/cm}^3$  und ist damit höher als bei Ganymed und Callisto. Offensichtlich besitzt Europa einen schweren Gesteins- und/ oder Eisenkern, der von einem bis zu 200 Kilometer tiefen Wasserozean mit Eiskruste oder massivem Eis bedeckt ist.

Die besten Voyager-2-Aufnahmen vom Juli 1979 besitzen eine Auflösung von rund  $2 \text{ km/pxl}$  und

zeigen bereits den offensichtlichen „Mangel“ an Kratern im Vergleich zu den älteren Oberflächen der Galileischen Monde Ganymed und Callisto. Außerdem ist ein regelrechtes „Netzwerk“ von dunklen Linien zu erkennen. Manche der Linien treten als „Doppelinie“ mit einem hellen Zwischenteil auf, daher nennt man diese Strukturen „Triple Bands“. Die Entdeckung von Vulkanismus auf Io in Kombination mit

*Dieses Bild zeigt ein kleines Gebiet auf Europa mit einer dünnen zerbrochenen Eiskruste in der Conamara-Chaos-Region. Die weißen und blauen Farben kennzeichnen Gebiete, die von einer feinen Schicht von Eispartikeln bedeckt sind, die bei der Entstehung des rund 1000 Kilometer südlich gelegenen Meteoritenkraters Pwyll ausgeworfen wurden. Die unbedeckte Oberfläche hat einen bräunlich-rötlichen Farbton, der durch Mineralien verursacht wird. Die Farben in diesem Bild wurden zur besseren Erkennbarkeit etwas verstärkt. (Bild: NASA / JPL / RP/F / DLR)*

der Theorie, daß diese starke endogene Aktivität auf Gezeitenreibung zurückzuführen ist, sowie der „Kratermangel“ führten zu der Hypothese, daß unter der Eiskruste von Europa eine Hydrosphäre, eine Art „unterirdischer Wasserozean“, verborgen sein könnte.

Die „Ozeanfrage“ rückte mit den ersten Galileo-Bilddaten wieder in den Mittelpunkt; die besten Bilder dreier gezielter naher und sechs „ungezielter“ Vorbeiflüge mit deutlich weiterem Abstand besitzen bis zu 20 Meter Bildauflösung und sind somit rund 100-mal schärfer als die Voyager-Aufnahmen.

Die Galileo-Bilder liefern tatsächlich eindeutige Hinweise auf einen zumindest prähistorischen Ozean. Als Beispiele seien das Gebiet, das die „Packeis-schollen“ zeigt, genannt, außerdem große dunkle Gebiete (sog. „Maculae“), die als Überreste von Einschlägen interpretiert werden, welche durch die Eiskruste durchgeschlagen haben müssen, sowie dunkle Flecken (sog. „Lenticulae“), die in den hochaufgelösten Bildern als aufgewölbte Strukturen identifiziert wurden und deren vermuteter Ursprung mit einem unterirdischen Ozean verträglich ist. Bis heute kontrovers wird aber die Frage diskutiert, ob der Ozean noch heute existiert, oder ob wir nur die Überreste vergangener geologischer Aktivität aus einer Zeit sehen, in der die letzten Bereiche eines ehemaligen Ozeans ausfroren und somit die meiste geologische Aktivität zum Erliegen kam.

Zwei Gruppierungen innerhalb des SSI-Teams liegen in ihren Abschätzungen zum Europa-Oberflächenalter weit auseinander. Die Gruppe um Clark Chapman vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado, glaubt, daß die Oberfläche noch heute starken Umwälzungen unterworfen ist und die Oberflächenstrukturen zum Teil nur wenige Millionen Jahre alt sein müssen – daß der Ozean also noch heute existiert. Im Gegensatz dazu ist der Autor

der Auffassung, daß wir in den Bildern auf bis zu drei Milliarden Jahre alte Strukturen blicken. Dieses Resultat ergibt sich aus Zählungen der Einschlagskrater auf Europa, die mit einem so hohen Alter kompatibel sind.

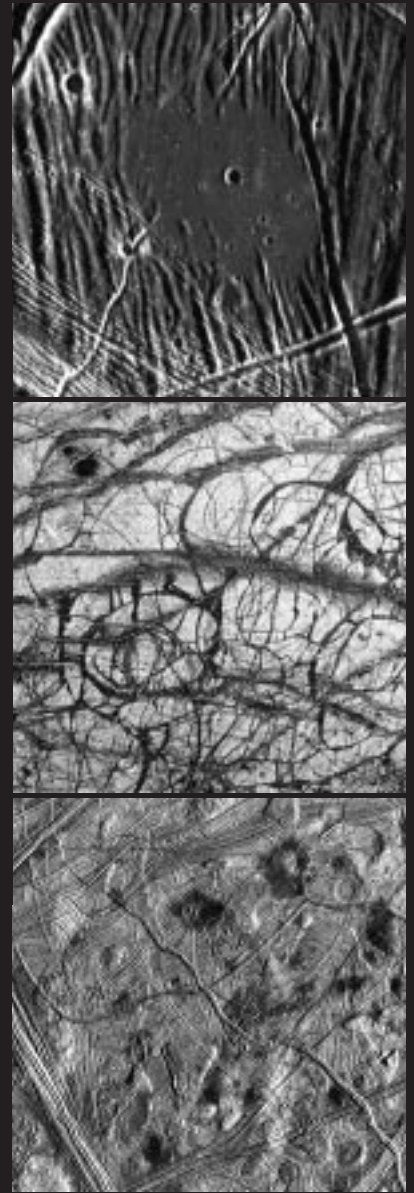
### Wie alt ist Europa wirklich?

Im Zuge der Galileo-Mission konnte ein wichtiger Beitrag zur Altersstellung von Körpern des Sonnensystems mit fester Oberfläche geführt werden. So wurde durch Messungen von Kraterverteilungen auf Gaspra und Ida seitens der Galileo-Arbeitsgruppe des DLR der Beweis für die gleiche Projektilpopulation im inneren Sonnensystem und im Asteroidengürtel geführt. Für das äußere Sonnensystem und insbesondere die Galileischen Monde hingegen war die theoretische Situation bis vor kurzem deutlich anders. Man nahm aus durchaus plausiblen Gründen an, daß die meisten Einschläge auf den Jupitermonden durch kurzperiodische Kometen verursacht werden, die Jupiters starker Gravitation „zum Opfer gefallen“ waren. Wie groß diese Kometenpopulation und die subsequente Zahl der Einschläge heute ist – darüber besteht Uneinigkeit.

Ein von einer Gruppe amerikanischer Wissenschaftler im Galileo-Imaging Team verfochtenes Modell geht von einer auch in jüngerer Vergangenheit noch relativ hohen Zahl von Kometen aus, was für die Jupitermonde – insbesondere Europa – recht „junges Alter“ zur Folge hätte. Auch die Oberflächen Callistos und Ganymeds wären zum größten Teil weniger als drei Milliarden Jahre alt, die Kruste Europas sogar nur wenige Millionen Jahre (lo ist wegen des aktiven Vulkanismus ein Sonderfall). Doch hat dieses Modell nach Ansicht des Autors Schwächen, denn es beinhaltet einen Widerspruch: Von Callisto, dem äußer-

sten der vier großen Monde Jupiters, weiß man aufgrund physikalischer Modelle, daß es sich um einen sog. „undifferenzierten“ Körper handeln muß; im Gegensatz zu seinen inneren Nachbarn erstarrte Callisto schon früh zu einem durch und durch gefrorenen Mond, dessen Bestandteile aus dem solaren Urnebel sich nicht in einen Kern aus schweren Komponenten und in einen Mantel mit darüberliegender Kruste aus leichteren Bestandteilen trennen konnten. Also müßte auch die früh erstarrte Oberfläche die Bedingungen des „Bombardements“ aus dieser Frühzeit widerspiegeln – was sie

*Die Oberfläche des Eismondes Europa offenbart sich auf den Galileo-Aufnahmen in unglaublicher Vielfalt. Abb. oben: Im Gebiet „Puddle“ sind Berg Rücken durch Eisvulkanismus überprägt worden. Abb. mitte: Spuren wie von einer Eiskunstläuferin ins Eis geritzt. Abb. unten: Spuren intensivster Eistektonik – für die Wissenschaft rätselhaft und faszinierend zugleich. (Bilder: NASA/JPL/RPIF/DLR)*







Die Minos Linea-Region auf Europa. Deutlich lassen sich die „Infrarot-hellen“ Ebenen (weißer Farbton) von den „Infrarot-dunklen“ Ebenen (blau) unterscheiden. In dunklem Braun erscheinen Gebiete mit größerem Anteil an „Nicht-Eis“-Material, wie z. B. die dunklen Flanken der sog. „Triple Bands“. (Bild: NASA/JPL/RPI/DLR)

auch tut. Nach dem Modell des Autors ist die Oberfläche Callistos zirka vier Milliarden Jahre alt.

Vermutlich geht das „amerikanische“ Modell von einer um zwei bis drei Größenordnungen zu hohen aktuellen Kometenpopulation im Jupiterrraum aus. Der Realität näher scheint das

DLR-Modell zu kommen, dem die Annahme zugrundeliegt, daß es nach dem heftigen, hauptsächlich aus dem Asteroidengürtel „gespeisten“ Meteoritenbombardement in der Frühzeit des Sonnensystems (vor 4,5 bis ca. 3,8 Milliarden Jahren) zu einem dramatischen Rückgang der Einschlagsrate kam. Das aufgrund der vielen Krater errechnete hohe Alter von Callisto und Ganymed (> 3,8 Milliarden Jahre) steht

also nicht im Widerspruch zu einem ebenfalls relativ hohen Alter der Europaoberfläche von ca. 3 Milliarden Jahren – trotz einer geringeren „Kraterdichte“ auf diesem Mond. Bei diesem Alter der Europakruste wäre die heutige Existenz eines Ozeans aus geschmolzenem Wassereis jedoch nahezu ausgeschlossen.



Die „Europa-Ozean-Frage“ ist eine der spannendsten der Planetenforschung. Deshalb wird die Verlängerung der Galileo-Mission speziell dem Mond Europa gewidmet sein. Zwischen Dezember 1997 und Februar 1999 sollen acht nahe Europa-Vorbeiflüge stattfinden und die Datenbasis für mittel- und hochaufgelöste Aufnahmen vervierfachen. Ein Bild soll sogar nur noch sechs Meter große Details zeigen – im Vergleich zu Voyager ein Faktor 300 an Schärfe! Die Chancen stehen gut, daß dann eindeutiger Hinweise darauf gefunden werden können, ob der Ozean noch heute existiert oder seit langer Zeit zugefroren ist.

### Ganymed: Eisriese mit bewegter Vergangenheit

Würde Ganymed, der größte Mond des Sonnensystems, nicht um Jupiter kreisen, sondern um die Sonne – man würde ihn leicht in das System der Planeten einreihen können. Größe (der Durchmesser beträgt 5262 Kilometer) und Masse ( $1,48 \times 10^{26}$  Gramm) verleihen dem Eisriesen die Eigenschaften eines eher terrestrischen Planeten. Eine mittlere Dichte von  $1,94 \text{ g/cm}^3$  ließ vermuten, Ganymed bestünde aus einem mehr oder weniger gut differenzierten Gemisch aus Silikaten und Eis-

verbindungen. Mehr als ein Drittel des einfallenden Sonnenlichts werden ins All zurückgestrahlt – viermal so viel wie beim Erdmond. Interessant für die Geowissenschaftler ist Ganymed vor allem wegen seiner „bewegten“ Vergangenheit, wovon die stark überprägte Oberfläche Zeugnis ablegt.

Etwas mehr als 40 Prozent der Oberfläche Ganymeds wird von dunklen Gebieten eingenommen. Diese bilden kreisrunde oder polygonartige Flächen mit Durchmessern von teilweise über tausend Kilometern. Man weiß, daß die dunklen Gebiete sehr alt sein müssen, an die vier Milliarden Jahre. Sie sind von zahlreichen Furchen überzogen, die Längen von 50 bis zu mehreren hundert Kilometern aufweisen können und sich im Mittel lateral in einem Abstand von etwa 50 km wiederholen. Außerdem finden sich vor allem in den dunklen Gebieten kreisrunde, glatte Flecken, deren Durchmesser mehrere hundert Kilometer betragen und teilweise von ringartigen Strukturen umgeben sind. Diese Strukturen wurden mit den Impakten großer Asteroiden oder Kometen in Verbindung gebracht und in Anlehnung an ein griechisches Wort für überprägtes Pergamentpapier „Palimpsest“ genannt.

Ganz anders geartet sind die hellen Gebiete, die etwas mehr als die Hälfte der Oberfläche Ganymeds ausmachen – stark zerklüftetes Terrain, das sich vermutlich auf Kosten der dunklen Gebiete gebildet hat. Erst Galileo zeigte, daß der Altersunterschied zwischen hellen und dunklen Gebieten weit kleiner ist als bislang angenommen. Die gesamte geologisch-tektonische Entwicklung der Oberfläche Ganymeds war also schon vor mindestens 3,5 Milliarden Jahren beendet, eher sogar noch früher. Dieses am Berliner DLR-Institut für Planetenerkundung durch Kraterhäufigkeitsmessungen erbrachte Ergebnis hat vor allem für die kontrovers diskutierte Interpretation von Altersdaten des benachbarten inneren Jupitermondes Europa weitreichende Konsequenzen. Bevor diese Entwicklung auf Ganymed jedoch abgeschlossen war, ereigneten sich tektonische Umwälzungen gigantischen Ausmaßes. Hiervon zeugen Rillensysteme in den hellen Gebieten, die über mehrere hundert Kilometer parallel verlaufen und ein völlig durcheinandergeratenes Streifenmuster ausbilden. Heute vermutet

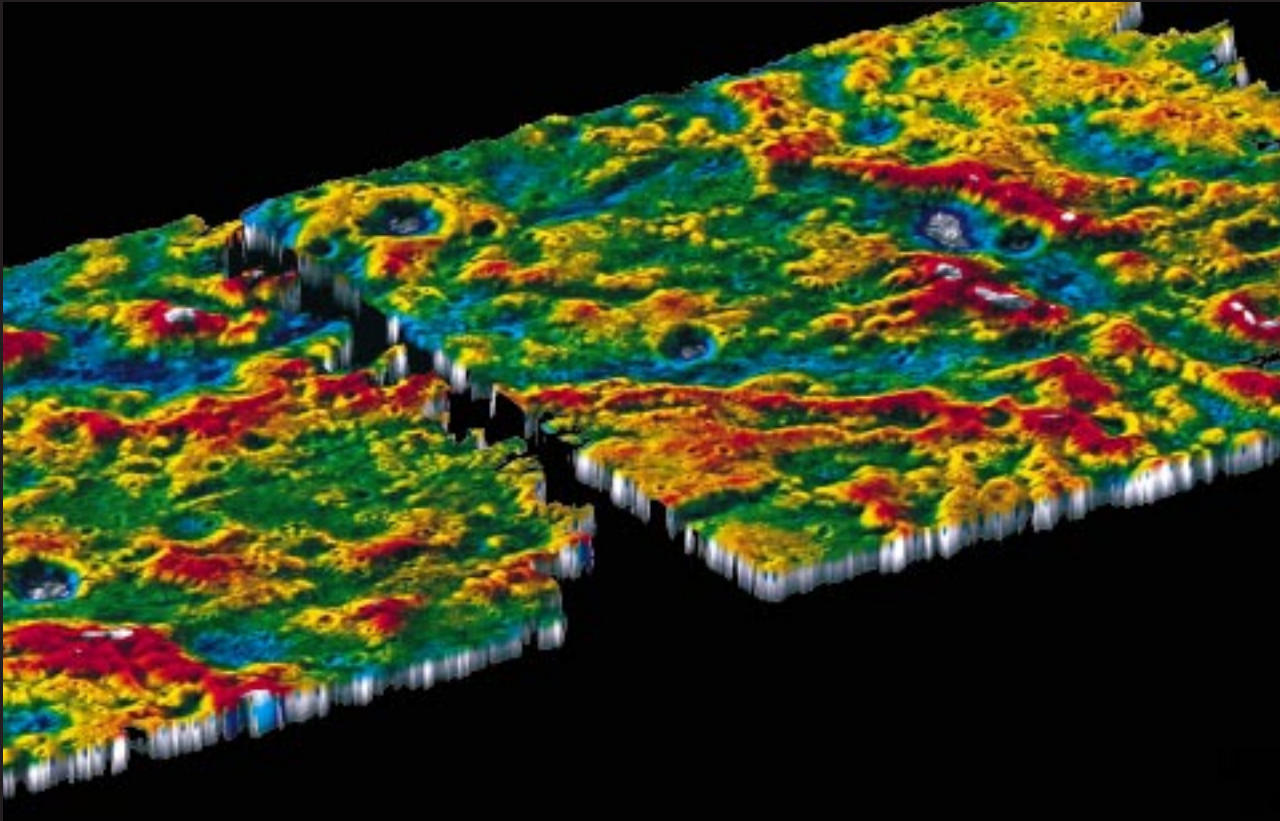
### Krater – die Jahresringe der Monde

**W**ie die Ringe im Stamm eines Baumes gibt die Anzahl der Einschlagskrater Hinweise auf das Alter eines Himmelskörpers. Vereinfacht gesagt: Je mehr Krater sich auf einer Oberfläche über die Jahrmillionen und -milliarden angesammelt haben, desto älter muß sie sein.

Allerdings wird diese Gleichung durch eine Reihe von „Unbekannten“ erschwert. Eine entscheidende Frage: Wie viele Einschläge pro Zeitraum legt man der Altersermittlung zugrunde? Es leuchtet ein: Wer einen regelrechten „Hagel“ von Kometen oder Meteoriten annimmt, kommt auch bei einer hohen Anzahl von Kratern auf ein „junges“ Alter, wer nur von sporadischen Einschlägen ausgeht, muß eventuell auf Milliarden von Jahren hochrechnen, um eine große Kraterhäufigkeit zu erklären. Außerdem ist die Einschlagsrate stark größenabhängig: Kleine Körper sind um ein Vielfaches häufiger als große.

Die „Einschlagsrate“ und damit die Asteroiden- oder Kometenhäufigkeit sind also planetologische Schlüsselfragen – über die in der Fachwelt keine Einigkeit besteht. Zumal es sich nicht um eine Konstante handelt: Von Schwankungen abgesehen, blieb im Laufe von Milliarden Jahren zwar die Zahl der ins Sonnensystem eindringenden Kometen wahrscheinlich konstant; die Zahl der Asteroiden hat jedoch stark abgenommen – umstritten ist allerdings, wie schnell, wie abrupt dies geschah. Auch ist davon auszugehen, daß die Dichte des „Bombardements“ regional verschieden, also nicht überall im Sonnensystem gleich war und ist.

Berücksichtigt man zudem, daß geologische Prozesse wie aktiver Vulkanismus die Spuren auf der Oberfläche verwischen und ältere Krater z.B. von Lavaströmen überdeckt werden, so ahnt auch der Laie, daß die Altersbestimmung von Himmelskörpern anhand der Kraterhäufigkeit um einiges komplizierter ist als das einfache Abzählen von Jahresringen. Und dennoch handelt es sich hier um ein faszinierendes Kapitel der Planetenforschung, das auch bei der Interpretation der Galileo-Daten vom Jupitersystem eine große Rolle spielt.



Aus Stereoabdeckungen markanter Landschaften auf Gany-med konnten am DLR-Institut für Planetenerkundung digitale Geländemodelle errechnet werden und mit den bis zu 43 Meter/Pixel auflösenden Bilddaten zu einer räumlichen Geländeansicht kombiniert werden; zusätzlich wurden die Höhenniveaus farbko-diert. Die Höhendifferenzen dieses Ausschnitts aus Galileo Regio betragen bis zu 1,5 Kilometer. (Bild: DLR)

man, daß die Rillenzüge durch aufeinanderfolgende Dehnungsperioden an Nahtstellen der dunklen Gebiete entstanden sind. Dabei kippten oder rutschten ganze Geländeblöcke in die entstehenden Zwischenräume nach – ehe die neu entstandenen Flächenelemente gegeneinander rotiert und verschoben wurden.

Ganymed könnte länger als sein äußerer Nachbar Callisto ein geschmolzenes Inneres, einen flüssigen, „beweglichen“ Mantel gehabt haben, der durch die Resonanzverhältnisse der Umlaufzeiten mit Europa und Io – sowie sicher auch Jupiter selbst – Gezeitenkräften ausgesetzt war. Noch nicht beantwortet werden konnte die Frage, wie sich die in einem hellen Gebiet mit Namen Uruk Sulcus anhand der digitalen Geländemodelle des DLR beobachteten unterschiedlichen „Wellenlängen“ der Rillensysteme erklären lassen: Die im größten Voyager-Maßstab gemessene Abfolge von Tälern und Bergrücken wird in den hochauflösenden Galileo-Bildern von einer engeren Berg- und Tal-Periode überlagert.

### Ganymed hochauflösend und in Stereo

Die Bildausbeute der beiden ersten nahen Vorbeiflüge an Ganymed – „G1“ und „G2“ – betrug über 70 zumeist monochrome Aufnahmen. Erste Schwerpunkte waren das helle Gebiet Uruk Sulcus und das dunkle Gebiet Galileo Regio. Bei den Auswertungen ergab sich im Galileo Imaging Team eine besonders fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem DLR-Institut für Planetenerkundung in Berlin und der amerikanischen Brown University (Providence/Rhode Island). Das DLR lieferte vor allem auf Kraterhäufigkeitsverteilungen basierende Altersmessungen. Außerdem wurden digitale Geländemodelle errechnet, die aus G1/G2-Stereoabdeckungen mit hochauflösenden (43-86 m/Pxl) Bilddaten höchster geometrischer Präzision und günstiger Beleuchtungsgeometrie abgeleitet werden konnten. Reliefbestimmungen aus digitalen Geländemodellen Galileos zeigen, daß die Höhenunterschiede in den Rillen mehrere hundert Meter betragen. Neben den im Englischen „groo-

ved terrains“ bezeichneten Berg- und Tal-Landschaften finden sich in den hellen Gebieten auch einige wenige etwas glatter geartete Flächen. Bei diesen Ebenen könnte es sich um vulkanische Ausflußregionen von geschmolzenem Eis („Kryovulkanismus“) handeln. Zum Beispiel offenbarten die Stereoansichten an einem kleineren Krater namens Ea einen gegenüber dem Kraterstand um mehrere hundert Meter erhöhten, aufgewölbten Kraterboden, den man sich mit Kryovulkanismus erklären könnte.

Wurde in den dunklen Gebieten, wie zum Beispiel in Galileo Regio, zuvor eine relativ dunkle homogene Oberfläche angenommen, konnte nun viel detaillierter zwischen unterschiedlich beschaffenen und auch verschieden alten geologischen Einheiten getrennt werden. Zur Genese werden derzeit drei Modelle diskutiert. Zum einen könnte man annehmen, die Kruste sei durch und durch dunkler Natur, mithin der Anteil an Silikaten auch in der Kruste höher als bislang angenommen.



Weiterhin in Erwägung gezogen wird die Ablagerung einer Schicht dunklen vulkanischen oder exogenen Materials über einer eher hellen Kruste. Dem steht eine dritte Theorie entgegen, die von gleichmäßig niedriger Konzentration der in der Kruste Ganymeds verteilten dunklen Gemengteile (im wesentlichen wohl Silikaten) ausgeht, die durch verschiedene geologische Prozesse an der Oberfläche konzentriert wurden. Denkbar sind hier Hangrutschungen, Sublimation des die Silikate anfangs einbettenden Eises, tektonische Vorgänge sowie die Überprägungen der Oberfläche durch Einschläge von Meteoriten, Asteroiden und Kometen.

Neben den hier exemplarisch vorgestellten Untersuchungen lieferte das Kameraexperiment für den Eismond zahlreiche weitere ausgezeichnete Bilddaten mit wertvollem wissenschaftlichen Inhalt. So zum Beispiel Aufnahmen von Rauhreif-Phänomenen in den nördlichen Breiten oder hochauflösende Sequenzen aus einer Sekundärkraterkette. Desweiteren existieren (wenige) Multispektralaufnahmen, und schließlich die mit elf Metern pro Bildpunkt bislang höchstaflösende Aufnahme der gesamten achtjährigen Reise Galileos.

Doch freuten sich die Planetenwissenschaftler auch über zwei eher unerwartete Entdeckungen Galileos. Zum einen schälte sich aus Telemetrie- und Bahndaten der Raumsonde der Befund heraus, daß Ganymed differenziert sein muß: Wahrscheinlich ist der Kern Ganymeds sogar metallischer Natur, umgeben von einem (inneren) Mantel aus silikatischen Gesteinen und einem (äußeren, fast 1.000 km mächtigen) Mantel aus durchgefrorenem Wasser-eis. Schließlich bildet eine Eiskruste, dem Silikate in unterschiedlichen Proportionen beigemischt sind, die äußerste Hülle. Damit nicht genug, stellte eine Forschergruppe um Gerald Schubert an der University of California fest, daß dem Kern Ganymeds ein aktives Magnetfeld innewohnt. Aus dieser Entdeckung ergab sich der Befund, daß das Magnetfeld Ganymeds quasi eine „Blase“ im viel weiter ins All hinausreichenden gewaltigen Magnetfeld Jupiters darstellt.

### Callisto – über vier Milliarden Jahre alt

Callisto ist der äußerste der vier Galileischen Monde und weist die niedrigste Albedo auf, ist aber immer noch zweimal so hell wie der Erdmond. Mit einem Durchmesser von ca. 4.810 Kilometer ist er fast genau so groß wie der Planet Merkur. Wie auf Ganymed und Europa wurde bei spektroskopischen Messungen Wassereis auf seiner Oberfläche entdeckt. Die Voyager-Kameras sahen eine fast einheitlich dunkle kraterübersäte Oberfläche ohne spektakuläre tektonische Formen, ganz anders als etwa die Oberflächen Ganymeds oder Europas.

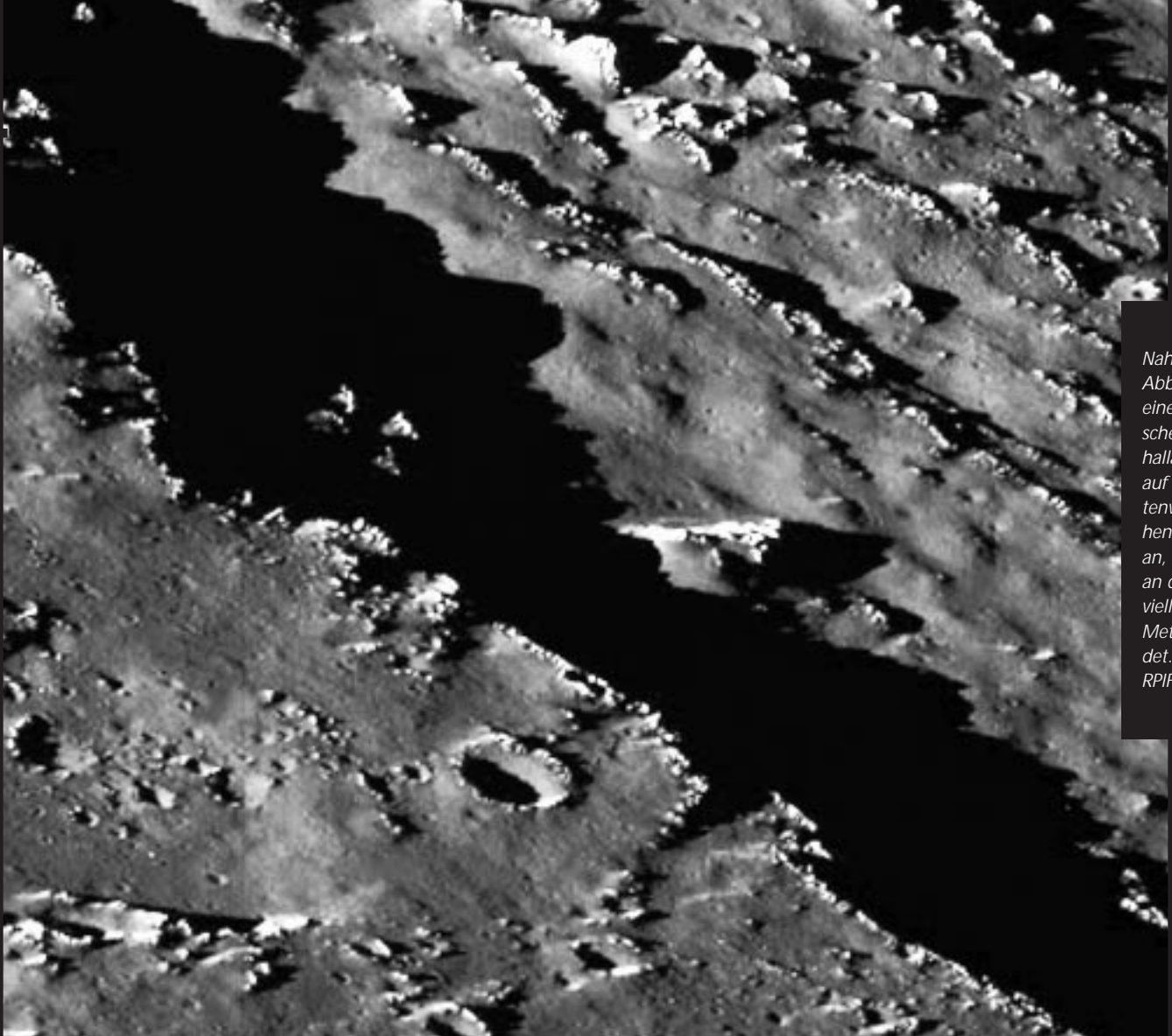
Hauptmerkmale Callistos sind mehrere große Multiringbecken mit einer Vielzahl konzentrischer Ringe, ähnlich den Ringbecken auf den ältesten Oberflächen der erdähnlichen Planeten (z.B. Mars oder Merkur), aber auch deutlich von diesen unterschieden durch die große Zahl der Ringe. Weiter fand man auf den Voyager-Aufnahmen Kraterformen ähnlich wie auf Ganymed: helle, kreisrunde oder irreguläre Flecken, vermutlich ehemalige Krater wie die Palimpsests auf Ganymed, oder Krater mit aufgewölbtem Inneren, sogenannte Domkrater.

Die Galileo-Kamera wurde beim ersten gezielten Vorbeiflug an Callisto auf das mit 4.000 Kilometer Durchmesser größte Multiringbecken Valhalla ausgerichtet. Dabei kam es zu einem überraschenden Ergebnis. Man hatte aus der Analyse der Voyager-Daten eine auch bei kleineren Durchmessern kraterübersäte Oberfläche erwartet. Stattdessen fand man erstaunlich wenig Krater mit Durchmessern von weniger als einem Kilometer. Die ganze Oberfläche erscheint auf den räumlich hochaufgelösten Bilddaten von einem Mantel eines dunklen Materials überzogen zu sein, dessen Natur (Zusammensetzung, Korngröße) noch nicht geklärt ist. Zudem sind höher gelegene, hellere Gebiete mit rauher Textur zu finden. Offenbar kam es zu Erosionserscheinungen, entweder bedingt durch Sublimation des Eises unter der Einstrahlung der Sonne oder durch die abrasive Wirkung der die Oberfläche bombardierenden Partikel. Möglicherweise ist Sublimation der dominierende Faktor, da diese Erosionserscheinungen verstärkt in den

zur Sonne hin ausgerichteten Kraterwänden auftreten. Weitere Beobachtungen der Callisto-Oberfläche von Gebieten außerhalb des großen Ringbeckens Valhalla beweisen, daß dieses dunkle, leicht wellige und möglicherweise sehr feinkörnige Material nicht auf das Valhallabecken beschränkt, sondern auf der gesamten Callisto-Oberfläche verteilt ist und eine große Zahl älterer Krater teilweise oder ganz überdeckt. Das abbildende Spektrometer (NIMS) an Bord von Galileo ermittelte die Zusammensetzung dieses Materials, was Kohlenstoffverbindungen als mögliche Komponente ergab.

Messungen der Kraterhäufigkeit ergaben folgendes Bild: Zum einen fallen bei den größten Kratern die Messungen mit den auf Voyager-Bildern des gleichen Gebietes durchgeführten Messungen zusammen. Andererseits nimmt bei Durchmessern von unter etwa ein bis zwei Kilometern die Kraterhäufigkeit stark ab, die Verteilung wird zunehmend flacher. Die Ursache dafür liegt entweder in der Erosion und Sedimentation des dunklen, vermutlich feinkörnigen Materials oder in einer geringeren Anzahl kleinerer Projektile, die die Körper im Jupitersystem bombardierten, möglicherweise auch in einer Kombination beider Effekte.

Legt man ein mondähnliches Bombardement mit einem exponentiellen Abfall in der Kraterbildungsrate und eine Entstehung der jüngsten Becken vor etwa 3,8 Milliarden Jahre zugrunde, so ergeben sich Alterswerte von mindestens 4,1 bis 4,2 Milliarden Jahren. Die Callisto-Oberfläche gehört damit zu den ältesten im gesamten Sonnensystem. Auch die größten Einschläge, bei denen die Multiringbecken entstanden, konnten durch Kraterhäufigkeitsmessungen datiert werden. Das größte Becken Valhalla entstand demnach vor etwa 3,9 Milliarden Jahren. Asgard, mit 1.700 km Durchmesser, ist dagegen wesentlich älter, etwa 4,25 Milliarden Jahre. Der überwiegende Teil der Callisto-Oberfläche entstand somit in der Zeit, die zwischen der Bildung dieser beiden Becken liegt.



*Nahaufnahme einer Abbruchkante an einem der konzentrischen Ringe im Valhalla-Multiringbecken auf Callisto. Der Schattenwurf der tiefstehenden Sonne deutet an, daß das Gelände an dieser Stelle eine vielleicht hundert Meter hohe Stufe bildet. (Bild: NASA/JPL/RPIF/DLR)*

### Neuer Schwung für die Planetenforschung

Die Galileo-Mission wird seit nunmehr fast einem Jahrzehnt von der Öffentlichkeit mit großem Interesse verfolgt. Trotz der anfangs aufgetretenen Probleme überwogen bei weitem die positiven Schlagzeilen, die der wertvollen wissenschaftlichen Ausbeute, aber auch der hohen technischen Zuverlässigkeit

der sehr umfangreichen Instrumentierung auf dem Raumflugkörper galten. Nach Jahren, in denen es in der unbemannten Raumfahrt etwas ruhig geworden war, verlieh Galileo der Planetenforschung neuen Elan. Gespannt erhofft sich die „scientific community“ von den zwei GEM-Jahren mit Galileo und ab 2004 von den Daten der Cassini-/Huygens-Mission zu Saturn und

seinen Trabanten weitere fundamentale Erkenntnisse über die Gasriesen und ihre Monde.

---

Dr. Gerhard Neukum, Direktor des DLR-Instituts für Planetenerkundung in Berlin-Adlershof und Professor für Planetologie an der Freien Universität Berlin, ist Mitglied des Galileo Imaging Team. Co-Autoren sind Tilmann Denk, Dr. Bernd Giese, Ulrich Köhler, Dr. Jürgen Oberst, Dr. Thomas Roatsch, Björn Schreiner, Peter Schuster, Roland Wagner, Ursula Wolf und Wolfgang Zeitler.