



GEM – Die Galileo Europa Mission

von Tilmann Denk und Tilmann Althaus

Nach elf Jupiterumkreisungen im Zeitraum von zwei Jahren ging am 7. Dezember letzten Jahres die Primärmission der Galileosonde [1] beim Jupiter zu Ende, und die Mission ging in die Verlängerung. Der zusätzliche Teil in diesem Jahr wird besonders dem Mond Europa gewidmet sein – daher seine Bezeichnung als "Galileo Europa Mission" (GEM) [2]. Die GEM wird im Winter 1999/2000 nach nahen Vorbeiflügen am Vulkanmond Io zu Ende gehen.

Eine Diskussion über eine mögliche Verlängerung der Galileo-Mission über die nominellen zwei Jahre hinaus hatte schon vor der Ankunft beim Jupiter am 7./8. Dezember 1995 begonnen. Bislang wurden in der Regel alle Raumsondenmissionen über die Primärmission hinaus weitergeführt, bis ihnen ein technischer Defekt oder zur Neige gehende Ressourcen ein Ende setzten. Für Galileo war die Lage etwas komplizierter, da das Problem mit der ungeöffneten Hauptantenne in Zeiten fehlenden Geldes nicht gerade als Empfehlung für eine Fortführung der Mission verstanden

werden mußte¹. Dem Projektmanagement war daher schon frühzeitig klar, daß die mögliche "Extended Mission" nicht einfach eine Weiterführung der Primärmission sein durfte, sondern etwas neues bieten sollte, das während der Primärmission nicht durchführbar war.

Etwas zunächst "nicht durchführbares" war die intensive und möglichst globale Erkundung des Mondes Europa (Abb. 1 linke Spalte) [3]. Die auf Voyager-Daten basierende und von Galileo bestärkte Hypothese, daß unter seiner Eiskruste

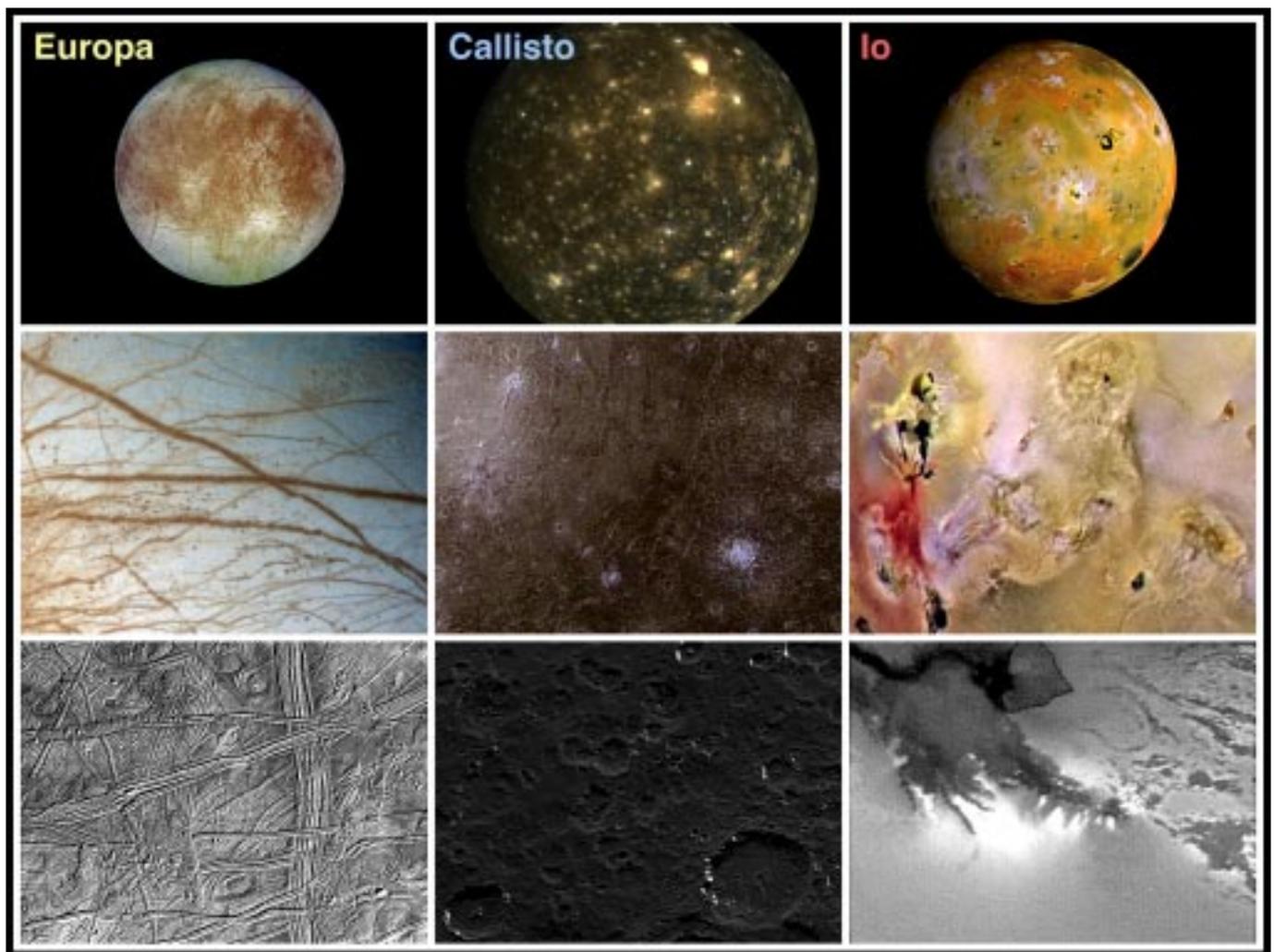


Abb. 1: Nahe Vorbeiflüge wird es für Galileo in der GEM an den Jupitermonden Europa (linke Spalte), Callisto (mittlere Spalte) und Io (rechte Spalte) geben. Obere Reihe: Globale Ansichten, maßstäblich (vgl. auch Tabelle 2). Das Bild von Callisto stammt von Voyager 2. Mittlere Reihe: Lokale Ansichten der drei Monde, jedes Einzelbild zeigt einen rund 1000 km x 750 km großen Ausschnitt der jeweiligen Oberfläche. Untere Reihe: Hochaufgelöste Bilder. Die Bildgrößen betragen 100 km x 75 km, die Bildauflösungen ca. 180 m/pxl. Das Io-Bild stammt von Voyager 1 und besitzt nur eine Auflösung von ca. 350 m/pxl.

kung wie schon die Europa-Vorbeiflüge zuvor ohne nennenswerten Treibstoffaufwand praktisch ballistisch durchgeführt werden muß, sind Gravity-Assist-Manöver am äußersten der vier Galileischen Monde, Callisto, notwendig. Vier Callisto-Vorbeiflüge, C20 bis C23, sollen zwischen dem 5. Mai und dem 16. September 1999 den Weg zum ersten gezielten Io-Encounter Galileos nach dem 7. Dezember 1995 freimachen.

(3) Nahe Io-Vorbeiflüge. Für den 11. Oktober 1999 ist mit I24 der erste gezielte Io-Encounter während der GEM vorgesehen. Die bei diesem Vorbeiflug zu erwartenden Aufnahmen werden eine höhere Auflösung besitzen als die im März 1979 von der Voyager-1-Sonde bei ihrem Io-Vorbeiflug gewonnenen Bilder (Abb. 1). Befindet sich die Sonde anschließend noch in einem guten Zustand, so kann bei I25 am 26. November 1999 Io erneut angefliegen werden, diesmal unter dem Südpol hindurch in nur 300 km Höhe. Rund 1/5 aller GEM-Daten soll dieser letzte Abschnitt liefern. Es ist anzunehmen, daß danach die Strahlungsgürtel der Galileo-Sonde so zugesetzt haben werden, daß kein weiterer Vorbeiflug mehr möglich sein dürfte. .

Encounter-bezeichnung und Mond	Encounter-datum	Vorbeiflug-distanz am gezielt angefliegenen Mond	Zielobjekte der SSI-Kamera
E12 (Europa)	16-Dez-1997	200 km	Ganymed, Io, Europa
E13 (Europa)	10-Feb-1998	3552 km	—
E14 (Europa)	29-Mär-1998	1649 km	Io, Europa, Ganymed
E15 (Europa)	31-Mai-1998	2516 km	Io, Europa
E16 (Europa)	21-Jul-1998	1837 km	Europa, Jupiter
E17 (Europa)	26-Sep-1998	3598 km	Europa, Ringe
E18 (Europa)	22-Nov-1998	2281 km	Io, Europa
E19 (Europa)	01-Feb-1999	1495 km	Europa, Jupiter
C20 (Callisto)	05-Mai-1999	1311 km	Europa, Jupiter, Callisto
C21 (Callisto)	30-Jun-1999	1050 km	Callisto, Io
C22 (Callisto)	14-Aug-1999	2288 km	Io, Amalthea, Jupiter
C23 (Callisto)	16-Sep-1999	1053 km	—
I24 (Io)	11-Okt-1999	500 km	Io, Thebe
I25 (Io)	26-Nov-1999	300 km	Europa, Thebe, Io, Amalthea

Tab. 1: GEM-Übersichtstafel.

Ungezielte, aber relativ nahe Vorbeiflüge:

E12, Ganymed, 15-Dez-1997, 14203 km; E14, Io, 29-Mär-1998, 250014 km; C21, Io, 02-Jul-1999, 125384 km; I25, Europa, 25-Nov-1999, 9963 km.

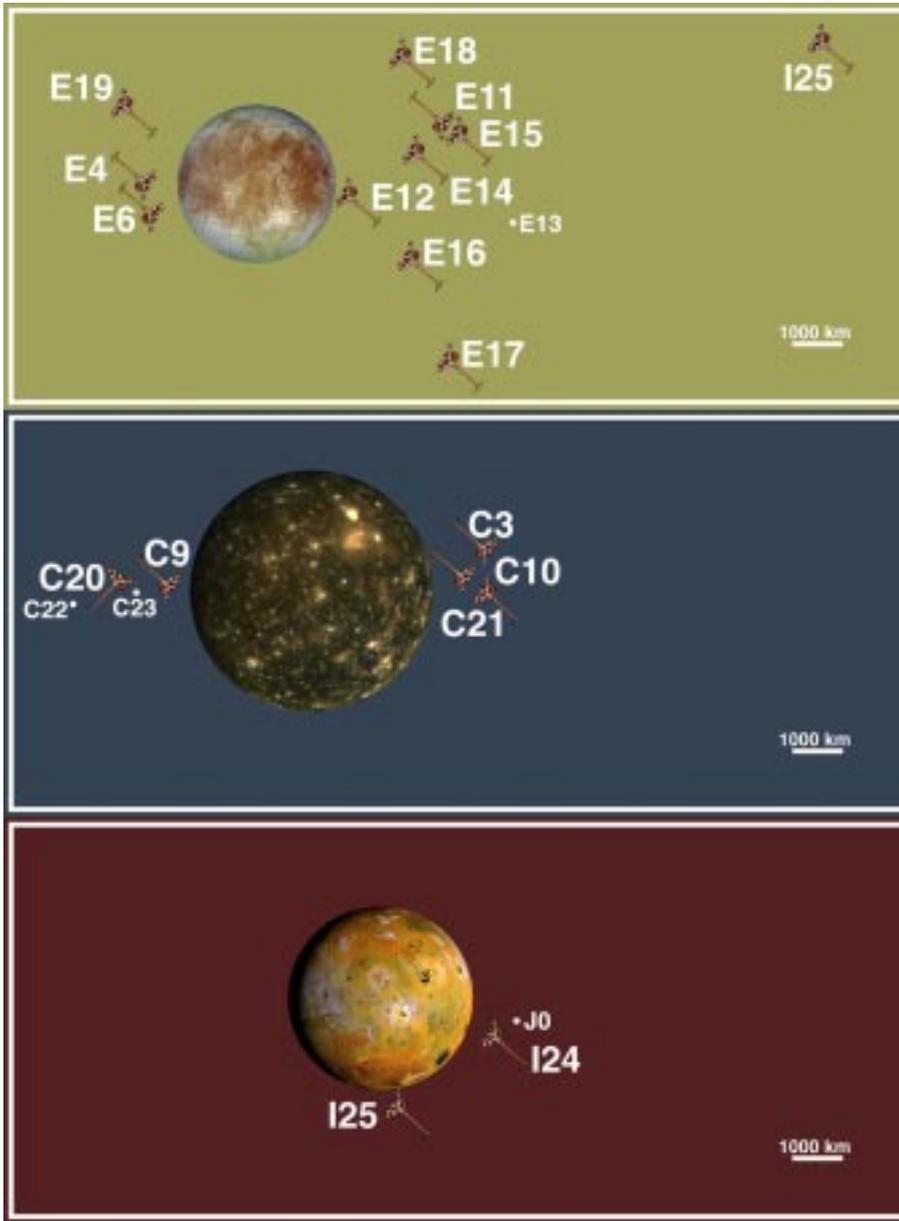
Wissenschaftliche Ziele

Das Hauptforschungsobjekt der GEM ist Europa, wobei die Ozeanfrage im Mittelpunkt steht. Weitere Fragen, die damit mehr oder weniger im Zusammenhang stehen, betreffen die Dicke der Eiskruste und ihre lokalen

Variationen, die Kraterverteilung und das absolute Alter der Oberflächen. Ebenfalls wichtig sind die geologischen Strukturen und die Stratigraphie (relative Alter) im regionalen Maßstab, die Topographie der Oberfläche sowie die Charakterisierung morphologischer Strukturen und ihre Verteilung auf Europa. Zusätzlich sollen die Zusammensetzung der "Nicht-Eis"-Materialien, die Farb- und Albedo-Unterschiede auf der Oberfläche in Abhängigkeit vom Oberflächenalter und die physikalischen Eigenschaften des Oberflächenregoliths untersucht werden. Außerdem wird nach aktiven Vulkanen gesucht. Die mit dem Ozean eng zusammenhängende These der "nicht-synchronen" Rotation (d.h. die Kruste Europas könnte ein klein wenig schneller rotieren als der gebunden rotierende Kern) soll besser ausgearbeitet werden. Auch die globale Form sowie der innere Aufbau Europas einschließlich der magnetischen Eigenschaften sollen bestimmt werden.

Schon die Europabilder der C3-, E4-, E6- und G7-Encounter aus der Primärmission zeigen Strukturen, die eine "hochmobile Schicht" nur wenige Kilometer unter der Oberfläche wahrscheinlich machen. Zu klären ist nun, ob diese auf einen Ozean hinweisenden Strukturen global anzutreffen sind, oder ob sie von Galileo nur zufällig gesehen wurden. Besonders wichtig ist die Bestimmung des Oberflächenalters. Sollten die beobachteten Oberflächenstrukturen jung sein – nach einem Modell nur wenige Millionen Jahre –, so wäre die Existenz eines Ozeans noch heute sehr wahrscheinlich. Sollten sie jedoch alt sein – dem konkurrierenden Modell nach reichen die Krater, die auf der Oberfläche sichtbar sind, aus, um festzustellen, daß vor rund einer bis drei Milliarden Jahren die geologische Aktivität an den meisten Stellen geendet hat –, dann ist eher anzunehmen, daß heute kein Ozean mehr existiert. Dieser wäre wohl schon vor Milliarden Jahren ausgefroren, und die in der Endphase vorhandenen geologischen Strukturen wären seitdem im Oberflächeneis konserviert. Sollte der Ozean noch heute existieren, so stellt sich sogleich die Frage nach der Entwicklung von Leben [8]. Obwohl Galileo in der Lage war, bei den beiden Erdvorbeiflügen im Dezember 1990 und 1992 das Vorhandensein von Leben auf unserem Planeten nachzuweisen [9], dürfte ein solcher Nachweis bei Europa wegen der dicken Eiskruste, welche den hypothetischen Ozean verdeckten würde, nicht gelingen. Hierfür müßte zu einem späteren Zeitpunkt eine speziell ausgerüstete Raumsonde Europa besuchen und erforschen.

Bei Io ist das primäre Forschungsziel die Charakterisierung der Oberfläche bei sehr hoher Auflösung von bis zu 12 Metern pro Bildpunkt oder Pixel (12 m/pxl), auch in der dritten Dimension (Stereobilder). Außerdem steht die Erforschung aktiver Phänomene wie des ausgeprägten Vulkanismus an vorderster Stelle. Hierbei seien die lokalen, fortwährenden Veränderungen auf der Oberfläche, der Wärmehaushalt der Io-Kugel und die Charakterisierung der Eruptionsmechanismen als Beispiele herausgehoben. Einige astronomische und physikalische Eigenschaften von Europa und Io sind in Tabelle 2 aufgeführt.



Neben Io und Europa werden in kleinerem Umfang auch Jupiter selbst, Ganymed, Callisto sowie die kleinen Monde Amalthea und Thebe von den Fernerkundungsinstrumenten beobachtet werden (Tabelle 1). Wie schon bei der Primärmission können nicht nur die "gezielt" angeflogenen Monde untersucht werden, sondern auch die anderen im Rahmen sogenannter "ungezielter" Vorbeiflüge. Wichtig ist auch hier, daß es sich um Beobachtungen handelt, die während der Primärmission nicht durchführbar waren. Für Jupiter ist die Erforschung der Dynamik der Jupiteratmosphäre in drei Dimensionen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung das Ziel der GEM-Untersuchungen, letztere wird fünfmal höher sein als während der Primärmission. Dabei stehen vor allem Konvektionsvorgänge, die vertikale Struktur der Jupiteratmosphäre und die Rolle und Häufigkeit des Wassers im Vordergrund. Die endgültigen Zielgebiete wurden noch nicht ausgewählt; Kandidaten sind z.B. 5-µm-Hot-Spot-Gebiete (Abb. 4), das Äquatorband, die Region nördlich des Großen Roten Flecks oder Strukturen zwischen den sogenannten "Weißen Ovalen". Die dreidimensionale Beobachtung ist durch die Verwendung spezieller Farbfilter (Methanfilter) möglich, die mehr oder weniger tief in die Atmosphäre hineinsehen können. Für Ganymed und Callisto steht der Vergleich von Oberflächenstrukturen mit denen Europas an vor-

Abb. 3: Galileos Vorbeiflüge an Europa (oben), Callisto (Mitte) und Io (unten). Die Abstände zu den Oberflächen sind maßstäblich eingetragen. Die Abweichungen nach oben oder unten weisen auf Vorbeiflüge in verschiedenen planetographischen Breiten hin. Raumschiffsymbole markieren Vorbeiflüge mit, Punkte Vorbeiflüge ohne Fernerkundung. Vorbeiflüge über der beleuchteten Tagseite sind rechts, über der unbeleuchteten Nachtseite links eingezeichnet.

derster Stelle, z.B. die Morphologie von Einschlagskratern und Tektonik, oder die Kraterhäufigkeiten zwecks Altersvergleich. Für die kleinen Monde Amalthea und Thebe (Abb. 5) wird es ab C22 interessant. Ein "Abtauchen in Richtung Io" bedeutet natürlich, daß Galileo auch näher an die kleinen, inneren Monde herankommen wird. Mit Auflösungen von 3,7 km/pxl (Amalthea) bzw. 2,1 km/pxl (Thebe) dürfen die bislang schärfsten Bilder dieser "bekraterten Kartoffeln" erwartet werden.

	Europa	Io
Mittlerer Abstand zur Sonne	779 Mio. km	779 Mio. km
Abstand zum Jupiter	670 900 km	421 600 km
Umlaufzeit und Rotationsperiode	3 Tage 13 Std. 13 min.	1 Tag 18 Std. 27 min.
Mittlerer Durchmesser	3 130 km	3 640 km
Masse	4,8·10 ²² kg	9,0·10 ²² kg
Mittlere Dichte	2,97 g/cm ³	3,57 g/cm ³
Oberflächentemperatur	-190 bis -140°C	-190 bis +1800°C
Wichtigste Oberflächenmaterialien	Wassereis, Evaporite (?)	SO ₂ , Schwefel (?), Silikate

Tab. 2: Physikalische und astronomische Daten von Europa und Io

Risiken für Galileo

Ein am Jupiter operierendes Raumschiff ist einer unwirtlichen Umgebung ausgesetzt, und es besteht keinerlei Möglichkeit, irgend eine Art von Wartungsdienst tätig werden zu lassen, falls ein Bauteil versagen oder eine Ressource zur Neige gehen sollte. Einzig und allein über die Funkverbindung ist eine (eingeschränkte) Kontrolle gegeben. Daher ist es wichtig, sich für die zwei GEM-Jahre zu überlegen, wie es um die Ressourcen bestellt ist und welche potentiellen Fehlerquellen die Mission vorzeitig gefährden könnten. Fünf Punkte sind zu nennen:

- (1) Energieversorgung durch die RTGs (Radioisotope Thermoelectric Generators),
- (2) Treibstoffvorrat für Lage- und Bahnkorrekturmanöver,
- (3) Strahlungsrate, welcher das Raumschiff und insbesondere die Elektronik ausgesetzt ist,
- (4) Anzahl der Start-/Stop-Zyklen des Tape Recorders und
- (5) mangelnde Finanzierung auf der Erde.

Punkt (5), der "Sparzwang", würde die GEM zwar nicht abrupt abbrechen, führt aber beispielsweise dazu, daß mit nur noch einem Fünftel des Personals am JPL in Pasadena, Kalifornien, von wo aus Galileo gesteuert wird, ausgekommen werden muß. Zwar sind alle Beteiligten nach zwei Jahren Primärmission schon sehr erfahren in ihrem jeweiligen Fachgebiet, dennoch ist eine deutliche Vereinfachung aller Prozesse oberstes Gebot. Für die Wissenschaft wirkt sich das reduzierte Budget so aus, daß fast keine "Sonderwünsche", welche die Sequenzplanung komplizierter machen würden, mehr berücksichtigt werden können. Ein kontinuierlicher Empfang des Signals durch das Deep Space Network wird ebenfalls nur noch während der Encounterphasen und nach dem Io-Vorbeiflug im Herbst 1999 möglich sein, nicht nur aus finanziellen Gründen, sondern weil die Empfangsstationen zum Teil auch mit anderen Missionen wie NEAR, Cassini und sogar Voyager 2 geteilt werden müssen. Auch die Veröffentlichung von Bildern im WWW wird eingeschränkt. So wurde der bisherige Service, jeden Werktag ein neues Bild zu bringen, leider zum Beginn der GEM eingestellt.

Für die drei erstgenannten Punkte Energieversorgung, Treibstoffvorrat und Strahlungsrate wird das erste GEM-Jahr (1998) noch als unkritisch angesehen. 1999 nimmt die Leistungsabgabe der RTGs weiter ab, so daß die Gewährleistung einer genügenden Energieversorgung für alle Geräte an Bord eine gewisse Herausforderung darstellen wird. Ein Treibstoffproblem wird voraussichtlich nicht eintreten, da alle Vorbeiflüge an Europa und später an Callisto praktisch ballistisch erfolgen. Das größte Risiko für die GEM stellen Jupiters Strahlungsgürtel dar. Die dem Design der Bauteile nach erlaubte Strahlendosis von 150 krad wird bereits während der Europa-Phase der GEM überschritten werden. Nach E19 wird die akkumulierte Dosis rund 200 krad betragen, nach I24 rund 300 krad und nach I25 rund 400 krad. Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, daß die ersten Bauteile (bestimmte Analog-Verstärker in Bordcomputer, Tape Recorder und Lagekontrollsystem) voraussichtlich erst bei über 300 krad ihren Geist aufgeben werden. Solche Aussetzer wären für das Raumschiff noch nicht "lebensgefährlich", allerdings würden sie momentan Galileo in einen "Sicherheitsmodus" versetzen, was z.B. während der Io-Vorbeiflüge aus wissenschaftlicher Sicht fatal wäre. Daher ist es notwendig, die Fehler-

schutzmechanismen Galileos zu verbessern. Für die kritischen Teile Galileos wird erwartet, daß sie Dosen bis 600 krad überleben. Diese Untersuchungen liefern jedoch nur Anhaltswerte; wann die ersten Bauteile schlapp machen, wird die Praxis zeigen. Immerhin wurden während der nominellen Mission bislang keine unerwarteten Probleme durch Strahlenschäden festgestellt.

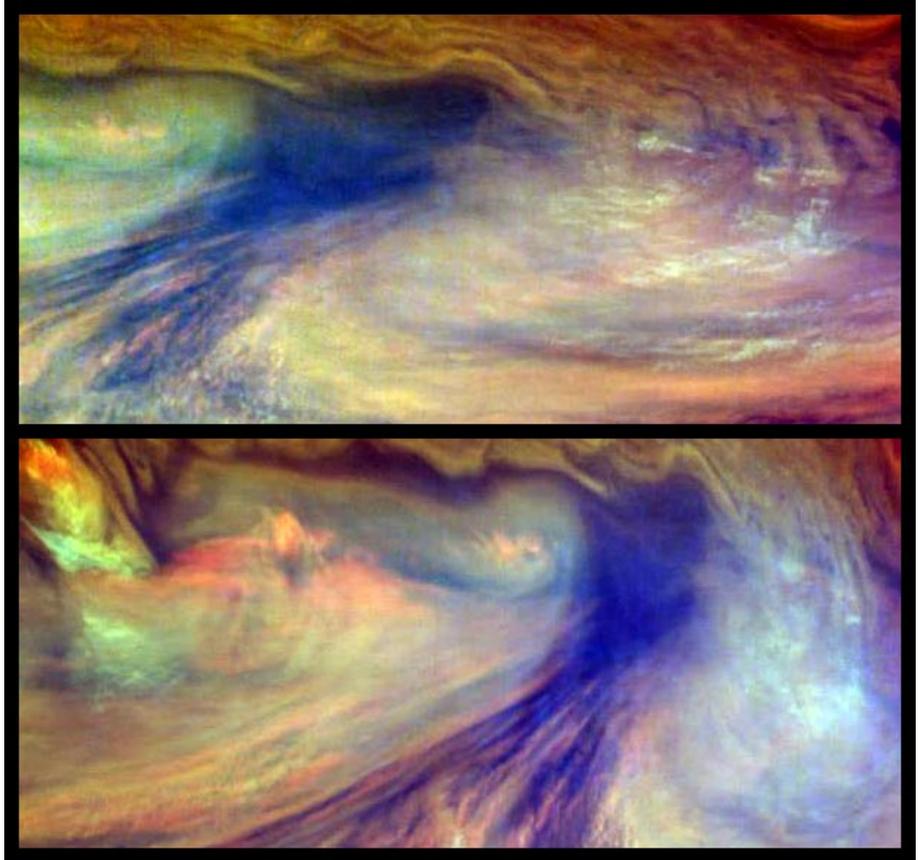


Abb. 4: Eine "5- μ m-Hot-Spot-Region" in der Jupiteratmosphäre, aufgenommen in den drei Filtern "Continuum" (756 nm), "Weak Methane" (727 nm) und "Strong Methane" (889 nm). Diese Filter sind auch für Jupiterbilder in der GEM vorgesehen, mit ihnen lassen sich Wolkenschichten in verschiedenen Höhen beobachten. Die hier gezeigten Aufnahmen entstanden während des E4-Encounters am 17. Dezember 1996 im Abstand von 2 Stunden und 23 Minuten, die Auflösung beträgt 29 km/pxl. In der Primärmission konnten drei Sequenzen "im Stundentakt" aufgenommen werden; für die GEM-Orbits E16, C20 und C22 sind acht Zeitschritte "im Viertelstundentakt" geplant. – 5- μ m-Hot-Spot-Regionen sind besonders interessant, weil die Galileo-Eintauchsonde am 7. Dezember 1995 am Rand eines solchen trockenen, wolkenarmen Gebietes niedergegangen war. Sie sind ein Kandidat für GEM-Jupiterbeobachtungen.

Der Tape Recorder ist für rund 20000 Start-/Stop-Zyklen ausgelegt, eine Zahl, die bereits zum Ende der nominellen Mission erreicht sein wird. Während der GEM wird der Tape Recorder rund 23000 weitere Male gestartet und gestoppt werden. Da es sich bei der Zahl "20000" um eine "weiche" Grenze handelt, ist es gut möglich, daß das Bandgerät bis zum Ende der GEM durchhalten und kein Problem darstellen wird. Da der Tape Recorder eine zentrale Rolle für die wissenschaftliche Datenaufbeute spielt, kann nur versucht werden, die Zahl der weiteren Start-/Stop-Zyklen so niedrig wie möglich zu halten und zu hoffen, daß er "durchhält". Für den Fall,

daß der Tape Recorder nicht mehr verfügbar sein wird, besteht während der GEM die Option, die Mission ohne das Bandgerät fortzusetzen.³

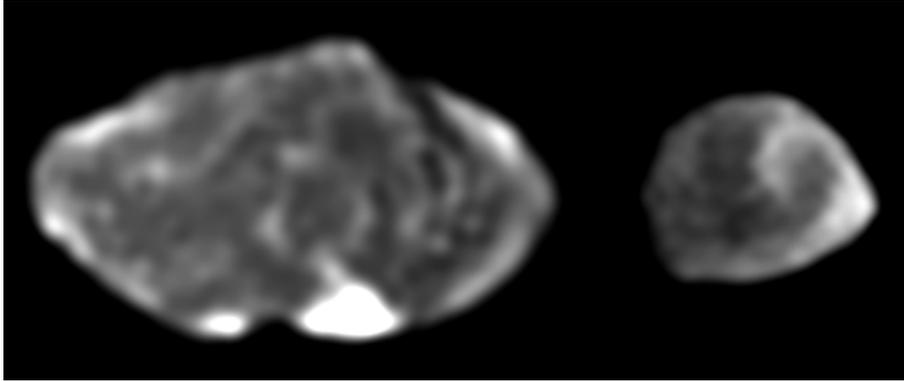
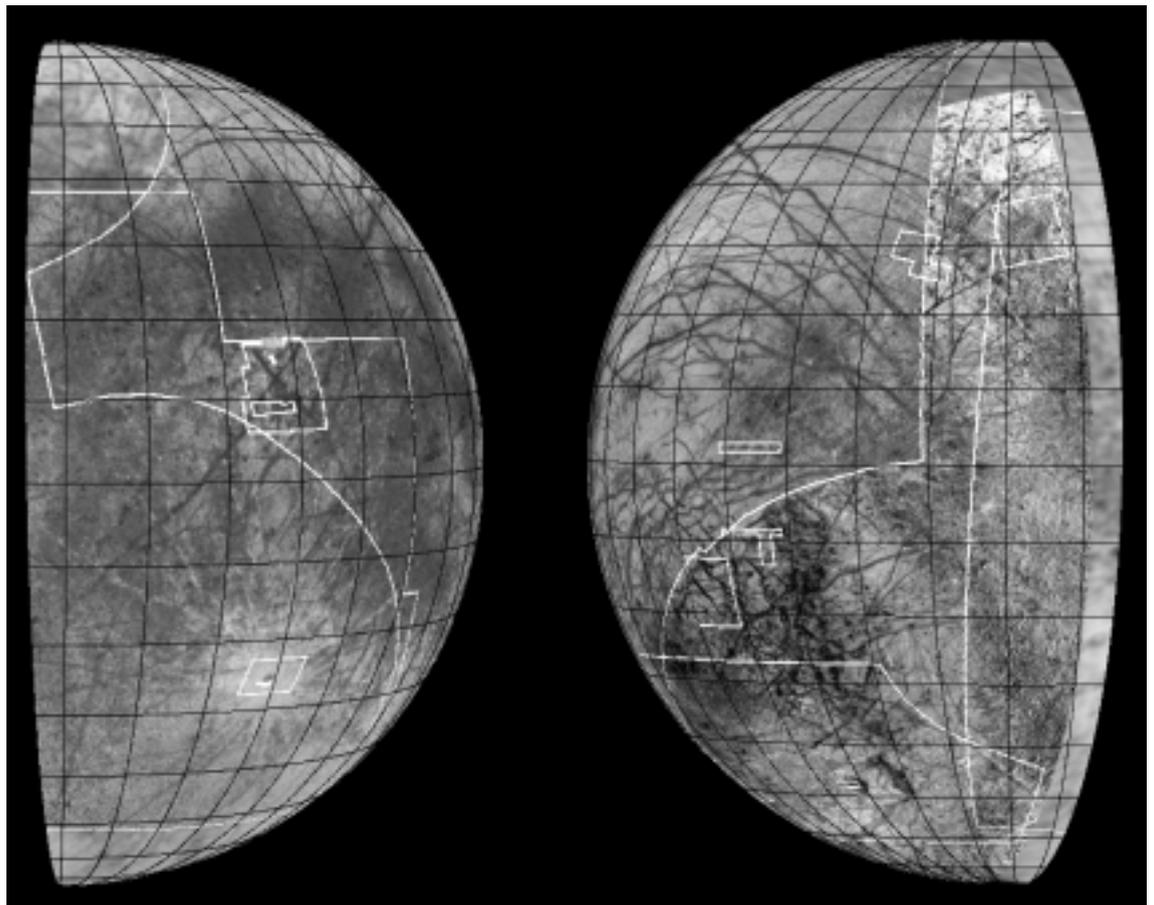


Abb. 5: Galileo-Aufnahmen der kleineren Monde Amalthea (links) und Thebe. Amalthea besitzt eine Ausdehnung von 247 km x 149 km x 128 km, Thebes Ausdehnung beträgt 116 km x 97 km x 86 km. Für die GEM sind ca. zweimal schärfere Aufnahmen von beiden Monden geplant

Die Europa-Phase

Am 18. Oktober 1997 erfolgte das Bahnkorrekturmanöver, das die Galileosonde auf GEM-Kurs brachte; die Geschwindigkeitsänderung (Δv) betrug 14,4 m/s. Am 6. November fand mit E11 der erste der kommenden neun Europa-Vorbeiflüge statt, links oben in Abb. 7 ist ein Gebiet gezeigt, das bei diesem Encounter mit hoher Auflösung in Farbe aufgenommen wurde. Noch als Teil der Primärmission wurden auch Callisto, Io, Jupiter, die vier kleinen Monde Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe sowie die Jupiterringe ins Visier der SSI-Kamera und des NIMS-Spektrometers genommen. Die dichteste Annäherung an Europa erfolgte um 21:32 Uhr (MEZ) über dem Punkt mit den planetographischen Koordinaten 26°N, 140°W in einer Überflughöhe von 2043 km.

Von der Geometrie her war E11 bereits ein typischer GEM-Encounter; beim An- und Abflug ist Europa



von Galileo aus jeweils ungefähr als "Halbmond" zu sehen (Abb. 6), während die nächsten Annäherungen unter niedrigem Phasenwinkel erfolgen, d.h. Galileo hat die Sonne ungefähr im Rücken. Charakteristisch für alle Vorbeiflüge an Europa von E11 bis E18 ist auch, daß die Oberflächenkoordinaten der Punkte der nächsten Annäherung (C/A, closest approach) für die "ungeraden" Orbits (d.h. E11, E13, E15, E17) zwischen 130°W und 140°W und für die "geraden" Orbits (E12, E14, E16, E18) zwischen 220°W und 230°W liegen (Tabelle 3). Für die "ungeraden" Orbits gilt außerdem, daß nur der Anflug bis kurz nach dem C/A für die Fernerkundungsinstrumente genutzt werden kann, weil danach die sich drehenden Ausleger des Magnetometers oder der RTGs ins Gesichtsfeld der Kameras geraten könnten. Dabei würden manche Aufnahmen durch diese Raumschiffteile verdeckt werden. (Von den Galileoplanern wird dieses "Verdecken" als "Booming" bezeichnet, von engl. "boom" = "Ausleger".) Für die "geraden" Orbits außer E12 gilt das umgekehrte: Hier tritt für Europa beim Anflug das "Booming" auf, und erst kurz vor dem C/A und während der gesamten Abflugphase ist uneingeschränkte Fernerkundung möglich. Die "geraden" und die "ungeraden" Orbits sind demnach in gewissem Sinne

Abb. 6: Typische Anflug- (links) und Abfluggeometrie während der Europa-Begegnungen der GEM; Galileo wird im Verlauf dieser Flugabschnitte Europa immer ungefähr als "Halbmond" sehen. Die weiß eingezeichneten Linien umrahmen Gebiete, die bereits während der Primärmission von der SSI-Kamera fotografiert wurden.

3. Diese potentielle Schwierigkeit mit dem Tape Recorder ist übrigens völlig unabhängig von den Problemen mit dem festgeklebten Band während der Tape-Recorder-Anomalie im Oktober 1995.

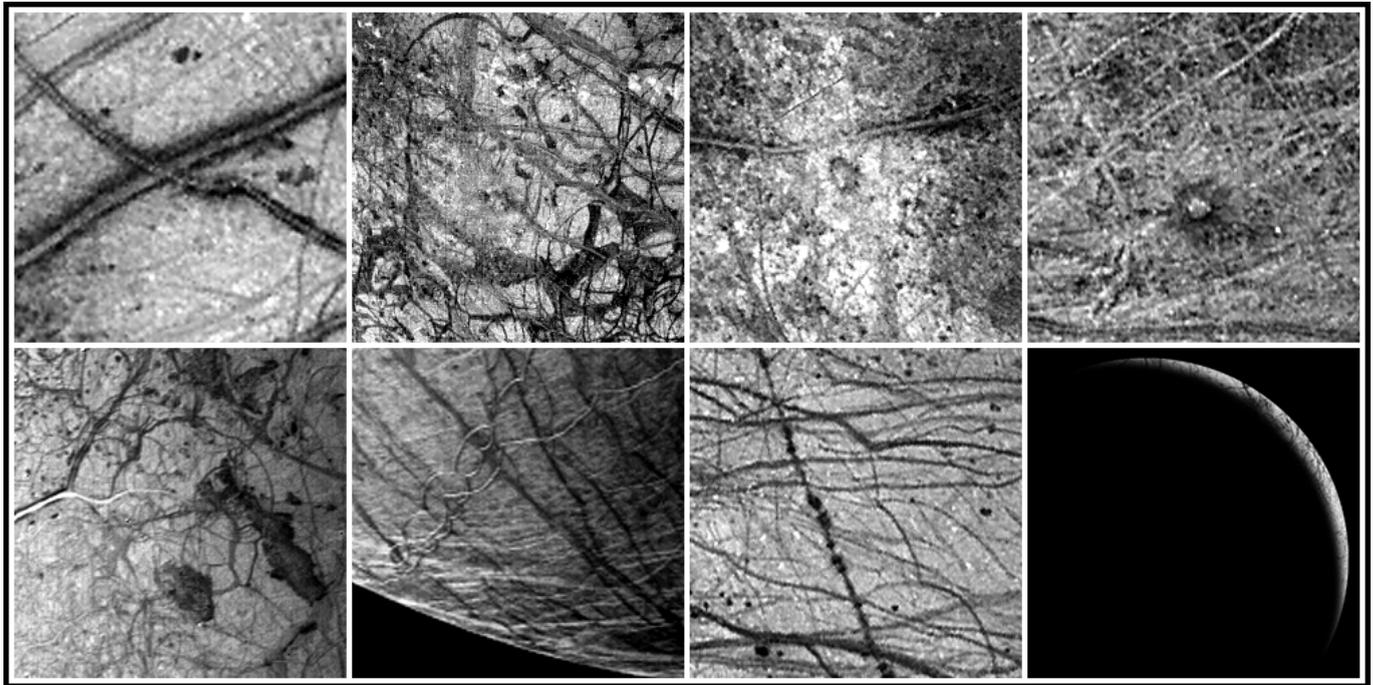


Abb. 7: Beispiele für Zielgebiete der SSI-Kamera während der GEM. Obere Reihe von links: E11 (sog. "Triple Bands" und dunkle Flecken), E12 (tektonisch besonders aktives Gebiet), E14 (Krater Mannann'an), E15 (Cilix). Untere Reihe von links: E16 (Agenor Linea und Thrace Macula), E17 (Südpolregion), E18 (Rhadamanthys Linea), E19 (Europa unter sehr hohem Phasenwinkel). Die hier gezeigten Bilder wurden von Voyager 2 im Juli 1979 und von Galileo während des G1-Vorbeifluges im Juni 1996 gewonnen. Das Bild für E19 ist eine Simulation.

komplementär. Im Verlauf der Europa-Phase der GEM können nicht alle Gebiete Europas abgedeckt werden. Im Osten bildet der 60. Längengrad West eine Grenze, während im Westen nicht über 310°W hinausgeblickt werden kann, so daß eine "unerforschte" Lücke von 110 Längengraden oder rund 30% der Europaoberfläche bestehen bleibt. Nur globale Bilder mit niedriger Auflösung (Abb. 8) zeigen diesen Bereich.

Für die SSI-Kamera lassen sich fast alle der geplanten Europa-Aufnahmen in vier Kategorien einordnen. Die meisten Aufnahmen werden hoch- bis höchstauflöste

Galileo	"ungerade" Orbits	"gerade" Orbits
Anflug	130°(H) - 240°(T)	220°(H) - 310°(T) / boomed
C/A	130-140°	220-230°
Abflug	60°(T) - 140°(H) / boomed	60°(T) - 140°(H) / boomed

Tab. 3: Für Galileo sichtbare Bereiche der Europaoberfläche während der Vorbeiflüge E11 bis E18.

Die Angaben sind ungefähre Werte für westliche Längengrade (°W). "T" = Terminator, "H" = Horizont, "C/A" = nächste Annäherung. "Boomed" = Blickfeld der Fernerkundungsinstrumente von Raumschiffauslegern verdeckt (vgl. Text). Extreme Werte, die nicht bei jedem Vorbeiflug erreicht werden, sind kursiv gedruckt. Das Gebiet zwischen 310°W und 60°W liegt bei den Vorbeiflügen E11 bis E18 nie im Blickfeld der Instrumente. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Bilder sein, die Details zwischen 6 und 300 Metern Größe zeigen sollen. Ein kleiner Teil dieser Bilder wird farbig sein. Eine möglichst weitreichende Flächenabdeckung soll mit einigen Bildsequenzen erreicht werden, die Bildauflösungen zwischen 200 und 230 m/pxl haben werden. Einige globale Farbbilder werden rund 1,5 km/pxl Auflösung haben, und zur Bestimmung der globalen Form Europas sind drei Sequenzen mit Auflösungen zwischen 4,4 und 4,9 km/pxl vorgesehen.

E12 am 16. Dezember (Tabelle 1) brachte die nächste Annäherung überhaupt an einen der Galileischen Monde. In nur 200 km Abstand raste Galileo mit rund 5,5 km/sec um 13:03 Uhr MEZ über die Oberfläche Europas hinweg. Noch 10 Minuten zuvor lag der Ort des Überfluges (8°S, 225°W) für Galileo hinter dem Horizont. E12 brachte die höchstauflösten Bilder der ganzen Mission: Mit 9 m/pxl wurde Conamara Chaos, das Gebiet mit den "Eisschollen", aufgenommen (Abb. 9). Kurz vor dem C/A wurde ein Gebiet überflogen, das eine besonders ausgeprägte tektonische Aktivität aufweist (Abb. 7). Acht Aufnahmen hiervon haben eine Auflösung von 12 m/pxl, und ein Bild zeigt sogar Details von nur noch sechs Metern Größe! Weitere 40 Bilder dieser Region, aufgenommen wenige Minuten nach dem C/A, erreichen Auflösungen zwischen 15 und 55 m/pxl. Insgesamt werden ca. 80-90 Europabilder der SSI-Kamera vom E12-Encounter erwartet. – Schon einen Tag früher, am 15. Dezember, wurde Ganymed in nur 14200 km Höhe überflogen. Dieser sehr dichte Vorbeiflug blieb leider aufgrund des Antennenproblems weitgehend ungenutzt, nur vier Bilder des großen Einschlagbeckens Gilgamesh wurden mit 159 m/pxl Auflösung aufgenommen. Dieses Becken spielt bei der Frage nach dem Alter der Oberfläche Europas eine besondere Rolle, weil es in einem Modell mit einem vermuteten Alter von 3,8 Milliarden Jahren als Marker verwendet wird.

E13 am 10. Februar 1998 blieb fernerkundlich ungenutzt, da aufgrund der nahen Konjunktion Jupiters mit

der Sonne am 23. Februar die Downlink-Situation für die E12-Daten nicht ausreichend war. Die Radiosignale der Sonde wurden beim Vorbeiflug aber genau verfolgt, so daß die Modelle vom inneren Aufbau Europas verfeinert werden können.

E14 brachte Galileo am 29. März 1998 um 15:24 Uhr MESZ bis auf 1649 km an die Europaoberfläche heran. Die schärfsten Aufnahmen, u.a. des Kraters Mannann'an, haben 20 Meter Auflösung. E14 bot nach G7 erneut die Möglichkeit, den "Schatten" Galileos zu photographieren. Selbstverständlich ist dieser viel zu klein, als daß er aus über 1800 km Distanz noch die Oberfläche Europas erreichen könnte. Der Wert dieser Aufnahmen liegt in der Bestimmung des Rückstreuverhaltens der Oberfläche beim Phasenwinkel 0°; daraus lassen sich viele Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials ziehen. – Auch für Io war E14 ein interessanter Orbit, da mit 250000 km Abstand zur Oberfläche die nächste Annäherung bis C21 erreicht wurde. Die E14-Io-Bilder werden als Grundlage für die Planung der gezielten Io-Begegnungen am Ende der GEM dienen. Ein globales Farbbild von Ganymed stellt die letzten Galileo-Aufnahmen dieses während der GEM fast unbeobachteten Mondes dar.

E15 fand am 31. Mai 1998 statt, der Vorbeiflug über 15°N, 134°W erfolgte in 2516 km Höhe um 23:12 Uhr MESZ. Unter anderem stand der Krater Cilix (Abb. 7) auf dem Beobachtungsprogramm. Da das "Booming" (s.o.) erst 108 Minuten nach dem C/A ungewöhnlich spät einsetzte, konnten auch ausgedehnte, bislang kaum erfaßte, weit östlich gelegene Gebiete fotografiert werden. Rund 40 SSI-Aufnahmen wurden auf dem Tape Recorder gespeichert.

E16 ist für den 21. Juli 1998 07:07 Uhr MESZ geplant. Südlich gelegene Gebiete mit der sehr ungewöhnlichen Agenor Linea und dem in Voyager-Bildern als dunkle Ebene erscheinenden Gebiet Thrace Macula (Abb. 7) gehören zu den Zielgebieten der Fernerkundungsinstrumente. Rund 80 Aufnahmen mit 20 bis 35 m/pxl und 200 bis 290 m/pxl Bildauflösung werden erwartet. – E16 ist der erste Umlauf von vier während der GEM, der Jupiteraufnahmen liefern wird. Die Strategie ist, eine Wolkenstruktur während eines Zeitraums von zwei Stunden in ihrer Bewegung vom Terminator bis zum Horizont in acht Zeitschritten und durch jeweils drei Farbfilter dreidimensional zu beobachten. Jede Einzelbeobachtung wird aus 2x2-Bildern mit je 30 km/pxl Auflösung bestehen, so daß insgesamt 96 Jupiterbilder zu erwarten sind. Das beobachtete Gebiet wird ca. 22000 km x 22000 km groß sein. Zudem sind Aurora- und Gewitterbeobachtungen vorgesehen.

E17 liefert mit rund 80 SSI-Aufnahmen und zahlreichen Daten der anderen Instrumente fast "Europa pur". Nur einige Aufnahmen der Jupiterringe mit einer Auflösung von ca. 30 km/pxl am Beginn und am Ende der Encounterphase bilden eine Ausnahme. Der Vorbeiflug erfolgt am 26. September 1998 um 05:51 Uhr MESZ in einer Höhe von 3598 km über dem Punkt 43°S, 139°W auf Europa und offeriert einige ungewöhnliche Möglichkeiten. E17 ist der südlichste aller Europavorbeiflüge und er-

laubt mit maximal 36 m/pxl in einem aus 4x4 Bildern bestehenden Mosaik einen hervorragenden Blick in die Südpolarregion (Abb. 7). Auch können nach dem C/A Gebiete bis 60° westlicher Länge gesehen werden, kein anderer gezielter Vorbeiflug erlaubt Aufnahmen so weit östlich. Zur besseren Abdeckung werden hier sogar Aufnahmen nach Einsetzen des "Booming" riskiert.

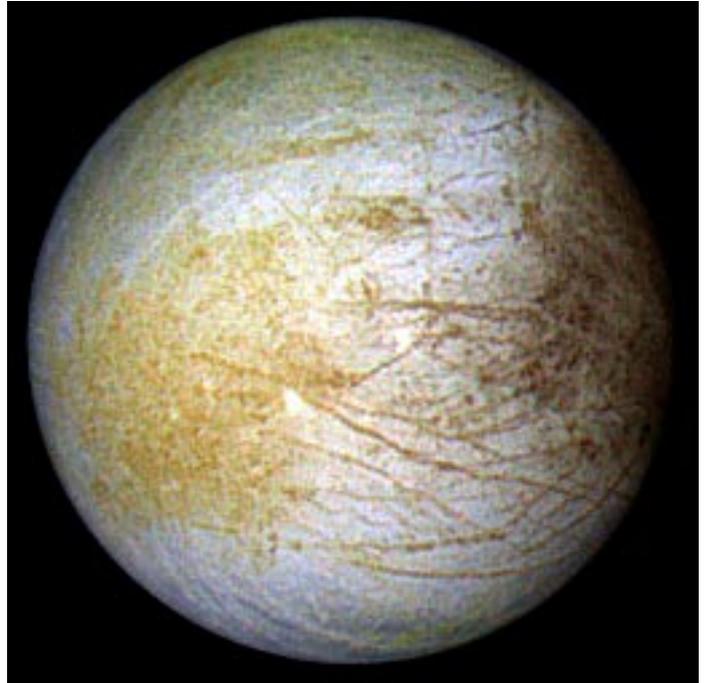


Abb. 8: Galileobild der Europahemisphäre bei 50°W, aufgenommen während des C9-Vorbeifluges im Juni 1997. Die Auflösung beträgt 12,6 km/pxl. Erst bei I25 Ende November 1999 werden diese Gebiete mit guter Auflösung zu sehen sein.

E18 (vgl. auch Titelbild) ist der zehnte gezielte Galileo-Vorbeiflug an Europa. Die Distanz bei der nächsten Annäherung beträgt 2281 km am 22. November 1998 um 12:48 Uhr MEZ. Für diesen nördlichsten Vorbeiflugpunkt aller Galileo-Europa-Vorbeiflüge sind die planetographischen Koordinaten 42°N, 220°W geplant. Rhadamanthys Linea (Abb. 7), Auswurfmaterial des Kraters Pwyll (der helle "Fleck" auf Europa in Abb. 1) und andere Gebiete werden mit maximal 37 m/pxl abgelichtet.

E19 ist die letzte gezielte Begegnung mit Europa und bietet durch die ungewöhnliche Geometrie des Vorbeifluges über der Nachtseite besondere Beobachtungsbedingungen. Durch den hohen Phasenwinkel kann das Rückstreuverhalten der Oberflächenpartikel studiert werden. Wenn Europa nur noch als schmale Sichel sichtbar sein wird (Abb. 7), kann der Horizont nach feinsten Partikeln abgesucht werden, die ähnlich wie Staub vor einer Fensterscheibe nur im Gegenlicht gut sichtbar sind. Vielleicht werden in diesen Bildern, für die eine Auflösung von 40 m/pxl angestrebt ist, aktive Geysire entdeckt. E19 wird der zweite GEM-Umlauf mit Jupiterbeobachtungen sein. Diesmal werden die Wolken in vier Zeitschritten zwei Stunden lang beobachtet, 48 SSI-Jupiter-Bilder sind zu erwarten. Durch den Vorbeiflug "auf der falschen Seite" Europas (Abb. 3) verläßt Galileo seine Europa-Rückkehrbahn und schwenkt in eine Bahn ein, welche die Sonde wiederholt an Callisto vor-

beiführen wird. Damit hat die zweite Phase der GEM begonnen, deren Ziel die Perijoviumsabsenkung der Bahn Galileos ist.

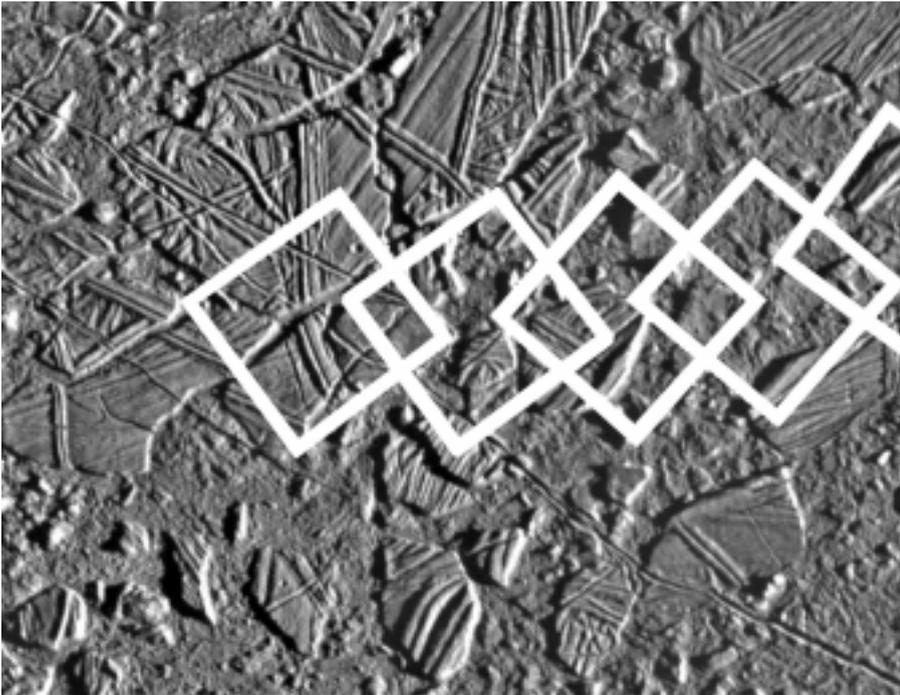


Abb. 9: Conamara Chaos, das Areal auf Europa mit den Eisschollen [6], wurde bei E12 am 16. Dezember 1997 mit einer Auflösung von nur neun Metern pro Pixel photographiert. Das hier gezeigte Kontextbild wurde am 20. Februar 1997 aufgenommen, seine Auflösung beträgt 53 m/pxl. Die weißen Rahmen zeigen die Zielgebiete für die E12-Aufnahmen.

Die "Dive-to-Io"-Phase

C20, der erste von vier nahen Callisto-Vorbeiflügen, ist für den 5. Mai 1999 um 16:07 Uhr MESZ vorgesehen. Galileo befindet sich dann bereits wieder auf dem Weg hinaus aus dem inneren Jupitersystem, das Perijovium wurde schon zwei Tage zuvor im Abstand von 9,4 Jupiterradien (RJ; 1 RJ = 71398 km) zum Jupitermittelpunkt durchflogen. Zum dritten Mal in der GEM wird Jupiter selbst intensiv studiert werden, allein für die SSI-Jupiter-Bilder sind rund 60% des Tapes reserviert. Einige Aufnahmen werden mit 15 km/pxl doppelt so scharf sein wie die meisten Bilder der Primärmission. Callisto selbst wird über seiner Nachtseite in 1311 km Entfernung überquert, und nach dem C/A kommt der Abendterminator ins Blickfeld der Fernerkundungsinstrumente. Die besten der geplanten elf Bilder werden 75 m/pxl Auflösung haben (vgl. auch Abb. 1, mittlere Spalte).

C21 wird der einzige GEM-Vorbeiflug sein, bei dem Galileo vor Erreichen seines Bahnperijoviums an Callisto vorbeifliegen wird, und der einzige, bei dem Galileo die Tagseite Callistos passieren wird (Abb. 3). In den Minuten der nächsten Annäherung am 30. Juni 1999 gegen 09:47 Uhr MESZ über dem bei 1°S, 74°W gelegenen Gebiet können die schärfsten Callisto-Aufnahmen überhaupt gemacht werden; fünf bis sechs Bilder mit einer Auflösung von 20 m/pxl sind für zwei Regionen nahe dem 106. westlichen Längengrad geplant. Die ersten beiden Vorbeiflüge an Callisto haben jetzt das Bahnperijovium Galileos auf 7,3 RJ abgesenkt, das Perijovium

wird am 2. Juli 1999 durchflogen. Nur fünfeinhalb Minuten später, um 07:09 Uhr MESZ, erfolgt die nächste Annäherung an Io. Mit 125400 km Distanz zur Oberfläche wird Galileo seinen geringsten Abstand zu Io seit dem 7. Dezember 1995 erreichen. Spektren der Vulkangebiete, rund 75 hochaufgelöste Aufnahmen bis 1,3 km/pxl und eine systematische "Durchmusterung" der Oberfläche nach lavaspeienden Vulkanen (eine sogenannte "Plume inventory") stehen auf dem Plan. Im Blickfeld wird sich die jupiterabgewandte Seite Ios befinden, die auch beim geplanten nahen Vorbeiflug im Herbst zu sehen sein wird.

C22, die dritte Begegnung mit Callisto innerhalb der GEM am 14. August 1999, dient zur weiteren Perijoviumsabsenkung. Das Perijovium von 7,3 RJ soll schon zwei Tage früher durchflogen werden. Ein letztes Mal werden Wolkenstrukturen der Jupiteratmosphäre beobachtet, dazu kommt eine weitere Durchmusterung der Io-Oberfläche nach aktiven Vulkanen. Erstmals soll während der GEM mit Amalthea

(Abb. 5) auch ein kleiner Mond photographiert werden. Die Felder- und Partikel-Detektoren, wie z.B. das Magnetometer oder der Staubdetektor erforschen das Magnetfeld Jupiters und den Torus um Io, welcher in dieser Phase der GEM ein besonders wichtiges Forschungsziel darstellt. Der Vorbeiflug an Callisto, der fernerkundlich ungenutzt bleiben soll, wird das Perijovium der Raum-schiffbahn auf 6,5 RJ absenken.

C23 am 16. September 1999 bringt Galileo schließlich auf Io-Kurs. Die Tage zuvor werden von den Felder- und Teilchendetektoren intensiv zur Erkundung des Io-Torus und des Jupiter-Magnetfeldes in der Nähe der Io-Bahn genutzt. Das letzte Gravity-Assist-Manöver an Callisto senkt das Bahnperijovium auf 5,5 RJ ab, so daß Io, deren große Bahnhalbachse 5,9 RJ beträgt, angefliegen werden kann.

Rückkehr zu Io

Die dritte und letzte Phase der GEM (Tabelle 1) wird auch die kürzeste sein. Galileo drang bereits wiederholt tief in die Strahlungsgürtel Jupiters ein, und es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis die ersten Bauteile ihren Dienst versagen werden und die Sonde endgültig nicht mehr steuerbar sein wird. Für I24 bestehen aber noch gute Aussichten, daß Io nicht nur erreicht wird, sondern daß auch wissenschaftliche Daten ihren Weg zum Tape Recorder finden und in den anschließenden Wochen zur Erde übermittelt werden können. Der Termin des Vorbeifluges – am 11. Oktober 1999 um 06:34 Uhr MESZ in 500 km Höhe über dem Punkt 17°S, 224°W der Io-Oberfläche (vgl. auch Abb. 3) – wurde mit Bedacht gewählt, da am 23. Oktober 1999 Jupiter von der Erde aus in Opposition zur Sonne stehen wird und somit die Datenübertragung besonders effektiv gestaltet werden kann. Auch wird durch das Gravity-Assist-Manöver an Io die

Umlaufperiode Galileos von zuvor 29 Tagen auf 46 Tage erhöht, damit möglichst viel Zeit bis zum nächsten Eindringen in die Strahlungsgürtel Jupiters bleibt. Der I24-Anflug erfolgt über der dunklen Io-Seite, so daß nach Überqueren des Morgenterminators zuerst die höchst-aufgelösten und später die niedriger aufgelösten Bilder gemacht werden können. Beim Anflug werden auch die großen Vulkane Pillan (Abb. 10) und Pele überflogen. Vorausgesetzt, diese Vulkane sind dann gerade aktiv, können die Partikelmeßgeräte möglicherweise In-situ-Messungen des ausgeworfenen Materials vornehmen.

auf den CCD-Chip nicht so stark ist, daß vor lauter "Schneegestöber" keine Oberflächenstrukturen mehr in den Bildern erkennbar sind.

I25 wird wohl die letzte gezielte Begegnung der dann über 10 Jahre währenden Galileo-Mission darstellen. Um den geplanten Zielpunkt bei 81° südlicher Breite in 300 km Abstand zur Io-Oberfläche durchfliegen zu können, muß Anfang November 1999 zum ersten Mal in der GEM ein größeres Bahnkorrekturmanöver ($\Delta v \approx 9$ m/s) durchgeführt werden. Zwölf Stunden vor der nächsten

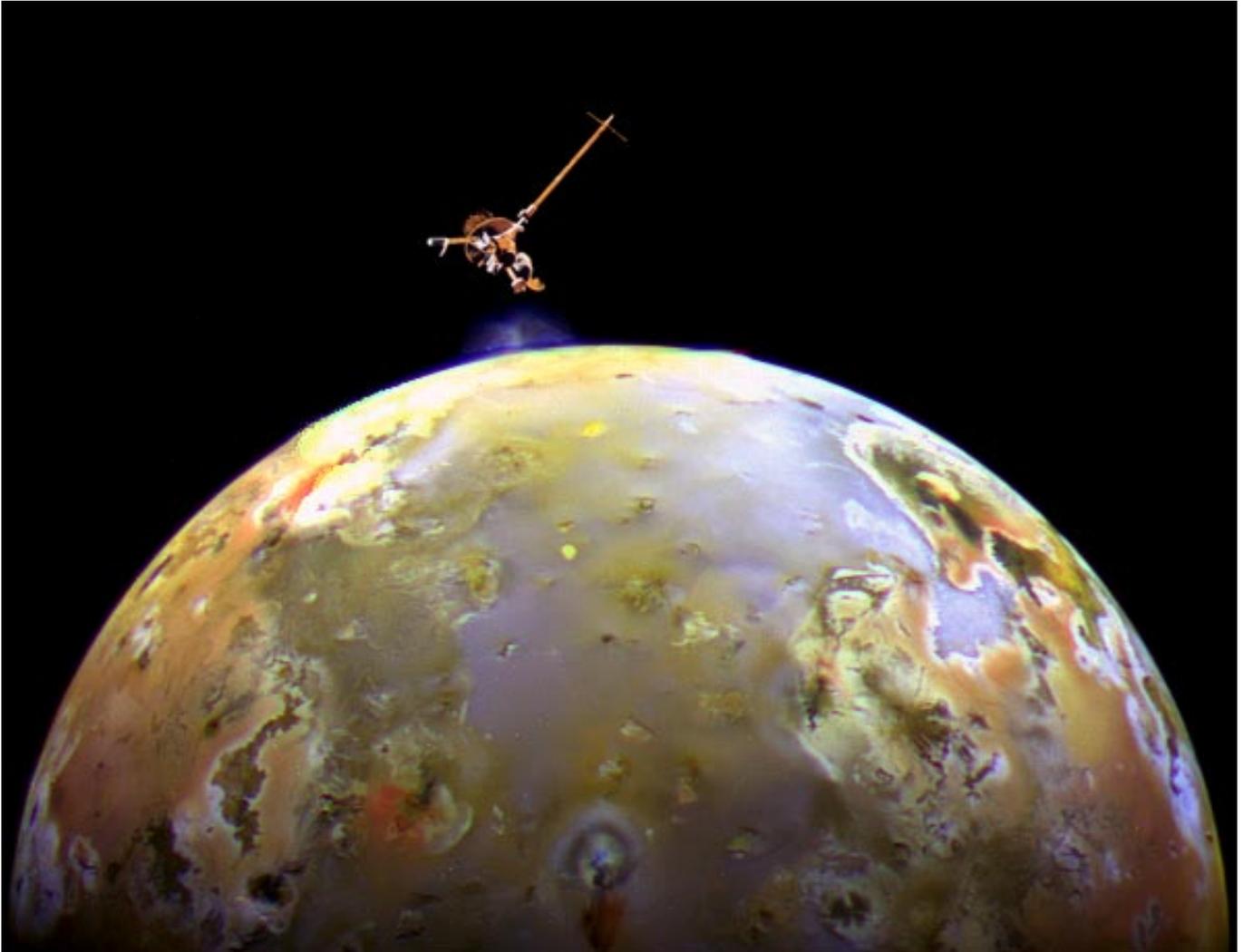


Abb. 10: Galileos Begegnung I24 mit Io im Oktober 1999. Drei Minuten vor der größten Annäherung werden beim Flug über den Morgenterminator die Vulkane Pele (18°S, 256°W) und Pillan (12°S, 244°W) in knapp 1000 Kilometern Höhe passiert. Das Io-Bild einschließlich Vulkanausbruch wurde bei C9 im Juni 1997 aufgenommen. Die Größe der einkopierten Raumsonde ist natürlich sehr übertrieben.

Detaillierte Planungen für die wissenschaftliche Erkundung Ios werden erst im Jahre 1999 endgültig festgelegt. Rund 150 Bilder der Kamera dürften zahlreiche Vulkane und andere Oberflächenstrukturen auf der jupiterabgewandten Hemisphäre zeigen, die besten könnten eine Auflösung von 12 m/pxl haben. Es bleibt zu hoffen, daß in den $2 \frac{1}{3}$ Sekunden, die jedes einzelne Bild zum Auslesen des CCDs in der Kamera gespeichert bleibt, das Elektronen- und Protonenbombardement

Io-Annäherung wird Galileo am 25. November 1999 um 17:28 Uhr MEZ in nur 9963 km Abstand über die Europa-Oberfläche hinwegfliegen (Abb. 3); dies wird die erste und einzige Möglichkeit sein, das bei den Europa-Encountern E11 bis E19 nicht einsehbare Gebiet zwischen 310°W und 60°W auf der jupiterzugewandten Seite im Detail zu studieren (Abb. 8). Je nach verfügbarer Downlinkkapazität wird diese Hemisphäre mit 1,4 bis 2 km/pxl Auflösung aufgenommen werden können. Geplant sind auch Detailaufnahmen mit bis zu 200 m/pxl. – Am 26. November 1999 um 05:01 Uhr MEZ ist dann noch einmal Io dran. Rund 120 SSI-Aufnahmen und zahlreiche Daten der anderen Instrumente sollen unser Wissen über diesen Jupitermond weiter vervollständigen. Die Polpassage ist insbesondere für die Magnetfeldmessungen wichtig; voraussichtlich läßt sich dann die Frage klären, ob Io ein eigenes Dipolfeld besitzt. Ob die I25-Da-

ten noch aufgezeichnet und zur Erde übertragen werden können, oder ob Galileo schon während des Durchfluges durch die Strahlungsgürtel seinen Kontakt zur Erde verlieren wird, ist zur Zeit nicht vorhersagbar. Am 4. Januar 2000 durchfliegt Galileo erneut sein Bahnperijovium, die Umlaufperiode nach dem I25-Vorbeiflug wird 39 Tage betragen. Die Finanzierung der GEM endet schließlich am 31. Januar 2000. Sollte Galileo dann wider Erwarten immer noch gut funktionieren, kann die Mission im Prinzip noch einige Monate fortgeführt werden.

Schluß

Verläuft die GEM wie geplant, so werden nach ihrem Abschluß etwa 600 bis 700 Europabilder mit einer Auflösung zwischen 2 km/pxl und 6 m/pxl sowie zahlreiche Spektren von Oberflächendetails zwischen 0,7 und 5,2 μm Wellenlänge vorliegen. Damit wird Europa der besterforschte Mond im äußeren Sonnensystem sein. Zum ersten Mal in der Geschichte der Planetenforschung werden auch höchstauflösende Daten von Io, dem vulkanisch aktivsten Körper im Sonnensystem, verfügbar sein. Schon Ende der 70er Jahre angedacht, wird das Galileo-Projekt nach mehr als zwei Jahrzehnten zum Abschluß kommen. Bereits heute, am Ende der Primärmission, läßt sich sagen, daß es wissenschaftlich ein großer Erfolg war, der durch die GEM nur noch gesteigert werden kann. Bislang gibt es noch keine offizielle Nachfolgemission, es wird aber bereits über einen Europa-Orbiter nachgedacht [10]. Dieser kann vielleicht schon im Jahr 2003 oder 2004 starten und würde – je nach Flugbahn im Sonnensystem – nach rund drei bis sechs Jahren Reisezeit das Jupitersystem erreichen. Bereits schon am 30. Dezember 2000, ein Jahr nach dem geplanten Abschluß der GEM, soll Jupiter noch einen Kurzbesuch erhalten: In rund 10 Mio. km Entfernung wird die Raumsonde Cassini, die am 15. Oktober 1997 ihre Reise begonnen hat, auf ihrem weiten Weg zum Ringplaneten Saturn an Jupiter vorbeifliegen [10]. Hierbei ergeben sich für die Wissenschaftler neue Möglichkeiten, die Galileo nicht hatte: Kontinuierliche Wetterbeobachtungen über einige Wochen hinweg, die Erkundung des äußeren Bereichs der Magnetosphäre sowie intensive photometrische Studien der Galileischen Monde. Außerdem wird erstmals ein Vorbeiflug an ei-

nem äußeren Jupitermonde erfolgen: Himalia soll am 18. Dezember 2000 in 4 1/2 Millionen km Entfernung passiert werden.

Literatur

- [1] Johnson, T.V.: Die Galileo-Mission. *Spektrum der Wissenschaft*, S. 40-48, Januar 1996.
- [2] Galileo Europa Mission: Mission Plan. JPL Document PD 625-10, 7 May 1997.
- [3] Malin, M.C. and D.C. Pieri: Europa. *In: Satellites* (J.A. Burns, M.S. Matthews, eds.), pp. 689-716. Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ, 1986.
- [4] Cassen, P.M., et al.: Is there Liquid Water on Europa? *Geophys. Res. Lett.* 6, p. 731-734, 1979.
Fischer, D.: Flüssiges Wasser auf dem Jupitermond Europa. *SuW* 34, Heft 11, S. 815-817, 1996.
- [5] Smith, B.A., et al.: The Galilean Satellites and Jupiter: Voyager 2 Imaging Science Results. *Science* 206, p. 927-950, November 1979.
- [6] Fischer, D.: Ein Ozean unter Europas Eisschollen? *SuW* 36, Heft 7, S. 636-638, 1997.
- [7] Sohl, F.: Der Jupitermond Io. *SuW* 32, Heft 11, S. 778-783 und Heft 12, S. 846-853, 1993.
- [8] Reynolds, R.T., et al.: On the Habitability of Europa. *Icarus* 56, p. 246-254, 1983.
- [9] Sagan, C., et al.: A Search for Life on Earth from the Galileo Spacecraft. *Nature* 365, p. 715-721, 21 October 1993.
- [10] Ice and Fire Preprojects WWW page: <http://www.jpl.nasa.gov/pluto>
- [11] Althaus, T.: Cassini-Huygens – Die Erforschung des Saturnsystems. *SuW* 36, Heft 10, S. 838-847, 1997.
Althaus, T.: Cassini: Aufbruch zum Saturn. *SuW* 37, Heft 1, S. 14-15, 1998.

Galileo-WWW-Adresse

<http://www.ba.dlr.de/ne/pe/galileo.html>
(enthält auch Links zu amerikanischen WWW-Adressen)