

Teil I.

Erforschung der Jupitermonde: Missionen und bisherige Erkenntnisse

4. Erkundung des Jupitersystems mit Raumsonden

4.1. Pioneer 10 und 11 - die ersten Sonden ins äußere Sonnensystem

Bis zur Entsendung der ersten Raumsonden waren zwölf Jupitersatelliten bekannt, darunter die vier großen, von Galileo Galilei 1610 mit einem der ersten Teleskope entdeckten Monde. Diese *Galileischen Monde* - von innen nach außen *Io*, *Europa*, *Ganymede*, und *Callisto* - erscheinen in Teleskopen mehr oder weniger nur als Lichtpunkte.

Die Vorbeiflüge der beiden Sonden **Pioneer 10** (Start: 2. März 1972) und **Pioneer 11** (Start: 5. April 1973) erweiterten wesentlich die Kenntnisse über den größten Planeten des Sonnensystems, insbesondere über die Dynamik seiner dichten, vorwiegend aus Wasserstoff bestehenden Atmosphäre. Beide Sonden mit 258 kg Gewicht waren identisch in Aufbau und Instrumentierung. RTG's (**R**adioisotope **T**hermonuclear **G**enerators) wurden zur Energieerzeugung eingesetzt. Beide Sonden rotierten mehrere Mal pro Minute um eine auf die Erde ausgerichtete Achse. Dadurch konnten Messdaten über energetische Teilchen und magnetische Felder des interplanetaren Mediums aus verschiedenen Richtungen gesammelt werden. Nachteilig ist eine derartige Konfiguration für abbildende Systeme wie Fernsehkameras, die eine stabile Plattform und genaues Kamera-Pointing erfordern. Die *Photopolarimeter* an Bord beider Sonden lieferten jedoch sehr gute Bilder der Jupiteratmosphäre. Erstmals wurden auch die vier Galileischen Satelliten in höherer räumlicher Auflösung abgebildet, als es mit Teleskopen von der Erde aus zur damaligen Zeit möglich war. Allerdings war die Auflösung für detaillierte geologische Untersuchungen noch nicht ausreichend¹.

Eines der wichtigsten Ergebnisse von Pioneer 10 war, dass eine Sonde auf dem Weg ins äußere Sonnensystem den Asteroidengürtel gefahrlos ohne Zusammenstöße mit Asteroiden durchqueren konnte. Pioneer 10 erreichte seine geringste Annäherung an Jupiter mit 130,000 km am 3. Dezember 1973. Nach den Erfahrungen dieses Vorbeiflugs wurde Pioneer 11 auf eine Bahn gelenkt, die die Sonde am 2. Dezember 1974 in deutlich geringerer Entfernung (43,000 km) an Jupiter vorbeiführte. Pioneer 11 nutzte die Gravitation des Jupiter um eine Bahn weiter zum Saturn einzuschlagen. Pioneer 11, nunmehr als **Pioneer Saturn** bezeichnet, passierte den Ringplaneten am 1. September 1979 in etwa 1,000,000 km Abstand.

Die Mission von Pioneer 11 endete am 30. September 1995. Mit dieser Sonde besteht kein Funkkontakt mehr. Obwohl die Mission von Pioneer 10 seit 31. März 1997 ebenfalls beendet ist, verfolgte man das Signal weiter, um Erfahrungen in der Kommunikation bei künftigen interstellaren Missionen zu sammeln. Pioneer 10 befindet sich derzeit (Stand: zweites Halbjahr 2006) in

¹Die Bilder des Pioneer-Photopolarimeters werden in Qualität und Auflösung mittlerweile von den Daten des *Hubble Space Telescope* übertroffen.

einer Entfernung von etwa 13 Milliarden Kilometer von der Erde (≈ 87 AU; 1 AU = 1 astronomische Einheit = $149.6 \cdot 10^6$ km) und entfernt sich mit etwa 12 km/sec aus dem Sonnensystem².

4.2. Das Voyager-Projekt

4.2.1. Voyager - die "Grand Tour" ins äußere Sonnensystem

Die **Voyager-Mission** ging aus der von der NASA im Jahr 1969 geplanten **Outer Planets Grand Tour** zu den großen Planeten des äußeren Sonnensystems hervor. Ursprünglich geplant mit insgesamt vier Starts zwischen 1976 und 1979 zu allen vier großen Planeten einschließlich Pluto, zwangen Budgetkürzungen die NASA jedoch, erhebliche Modifikationen an diesem Projekt vorzunehmen. Man entschied sich schließlich für eine auf vier Jahre ausgelegte Mission mit zwei unbemannten Sonden, die lediglich Jupiter und Saturn zum Ziel hatten. Bei den beiden Sonden der ursprünglich mit *Mariner Jupiter Saturn* bezeichneten und dann in **Voyager** umbenannten Mission handelte es sich um Weiterentwicklungen von Sonden des Typs *Mariner*, die zwischen 1964 und 1971 zu Mars, Venus und Merkur geschickt worden waren.

Die Kamerasysteme der beiden je 825 kg schweren Voyager-Sonden waren so ausgelegt, dass sie bei den Vorbeiflügen an Jupiter, Saturn und deren Monden, entgegen ihren beiden Vorgängern Pioneer 10 und 11, eine Vielzahl von Bildern hoher räumlicher Auflösung in mehreren Spektralkanälen liefern konnten. Die räumliche Auflösung der Bilddaten der einzelnen Objekte war gegenüber Pioneer um etwa einen Faktor 40 verbessert. Wegen der unterschiedlichen Größen der einzelnen aufzunehmenden Objekte entschied man sich für den Einsatz je einer Telebild- und einer Weitwinkelkamera auf jeder der beiden Sonden. Als weitere fernerkundliche Instrumente waren ein Ultraviolett-Spektrometer, ein Infrarot-Interferometer, -Spektrometer und -Radiometer, und ein Photopolarimeter vorgesehen. Die wissenschaftliche Instrumentierung der beiden Voyager-Sonden geht aus Bild 4.1 hervor.

Das **Voyager Imaging Experiment** sollte, neben Abbildung und Erforschung der Jupiter- und Saturnatmosphären im Detail, folgende auf die einzelnen Satelliten konzentrierte Aufgaben erfüllen (*Smith et al.*, 1977):

- Identifizierung möglicher Atmosphären der Jupiter- und Saturnsatelliten;
- Untersuchung der Bewegung und der Feinstruktur der Saturnringe; Auffindung neuer noch unbekannter Ringe;
- Entdeckung noch unbekannter Satelliten;
- Bestimmung geophysikalischer Parameter der Satelliten (exakter Durchmesser, Masse, Dichte und Abweichung von idealer Kugelform);

²Ein letztes sehr schwaches Funksignal konnte am 23. Januar 2003 aufgefangen werden. Pioneer 10 bewegt sich auf den etwa 68 Lichtjahre entfernten Stern Aldebaran im Sternbild Stier zu, den sie in etwa 2 Millionen Jahren erreichen wird. Informationen auf der Webseite:
http://spaceprojects.nasa.arc.gov/Space_Projects/pioneer/PNhome.html

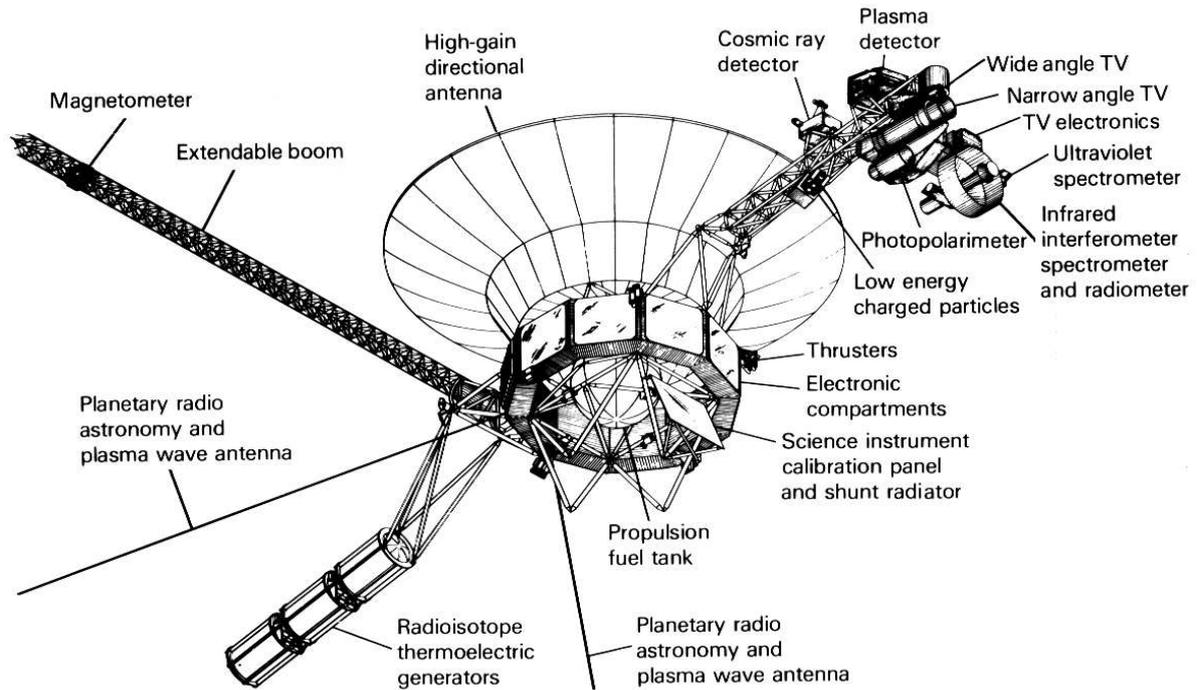


Abbildung 4.1.: Wissenschaftliche Instrumentierung der Voyager-Sonden.

- Vergleichende geologische Untersuchungen der Oberflächen der Satelliten, teilweise mit einer räumlichen Auflösung von weniger als 1 km pro Bildpunkt;
- Identifizierung und Beobachtung zeitlich variabler Phänomene auf den Satelliten.

4.2.2. Missionsverlauf

Beide Voyager-Sonden wurden 1977 gestartet, Voyager-2 zuerst am 20. August 1977, am 5. September 1977 Voyager-1. Letztere Sonde war in eine "schnellere" Flugbahn eingeschossen worden und überholte Voyager-2 am 15. Dezember 1977 in einer Entfernung von 170 Millionen Kilometer von der Erde. Wie schon die beiden Pioneer-Sonden zuvor hatten im September bzw. Oktober 1978 auch die beiden Voyager-Sonden den Weg durch den Asteroidengürtel unbeschadet überstanden.

Die Flugbahnen beider Sonden wurden so gewählt, dass sie in jedem der beiden Satellitensysteme an unterschiedlichen Satelliten vorbeikamen, und dass von den gleichen Satelliten unterschiedliche Hemisphären erfasst werden konnten. Entgegen der ursprünglichen Auslegung des Projekts auf nur vier Jahre ergab sich auf Grund einer nur alle 176 Jahre wiederkehrenden Konstellation der vier äußeren Planeten die Möglichkeit, die Flugbahn der zweiten Sonde Voyager-2 so zu modifizieren, dass sie unter Ausnutzung der Gravitation von Jupiter und Saturn in der Lage war, das Uranus-System, und mit Hilfe eines weiteren Swing-By-Effekts durch die Gravitation von

Uranus auch das Neptun-System zu erreichen. Der Großteil der Aufgaben der ursprünglichen "Grand Tour" konnte damit erfüllt werden.

Ein Weiterflug der Sonden zum Zwergplaneten Pluto und seinem 1978 entdeckten Mond Charon, um die "Grand Tour" zu vollenden, war aus bahntechnischen Gründen nicht möglich. Ein Vorbeiflug an Pluto, Charon und den beiden weiteren, in 2005 durch das *Hubble Space Telescope* (*HST*) entdeckten beiden Monden Hydra und Nix wird der im Januar 2006 gestarteten Mission *New Horizons* (*Pluto-Kuiper-Belt*) voraussichtlich in den Jahren 2016/2017 vorbehalten sein.

Mit dem Eintreffen von Voyager-1 am Jupiter am 5. März 1979 wurde ein neuer Abschnitt in der Erforschung des äußeren Sonnensystems eingeleitet. Die Kameras zeigten neue, bisher unbekannt Details der Jupiteratmosphäre und die unterschiedlichen Oberflächen der Galileischen Satelliten. Dazu wurden zusätzliche kleinere Monde und ein bis dahin nicht bekannter Jupiterrings entdeckt. Vier Monate später am 9. Juli 1979 gelang Voyager-2 eine ähnlich gute Bilddatenausbeute der Jupiteratmosphäre, des Jupiterrings und anderer Gebiete der Galileischen Satelliten.

Am 12. November 1980 wurden von Voyager-1 erstmals Nahaufnahmen des Saturn, der Saturnringe und der größeren Monde des Saturn zur Erde übermittelt. Die Aufgabe von Voyager-1 war damit erfüllt. Umfangreicher war das Programm von Voyager-2, zunächst mit dem Vorbeiflug am Saturn und seinen Monden am 25. August 1981. Die Sonde flog weiter ins äußere Sonnensystem und lieferte am 24. Januar 1986 Bilddaten von Uranus, von seinen Ringen, von den fünf bis dahin bekannten und von zehn neuentdeckten Monden. Abschluss der Voyager-Vorbeiflüge an den Planeten und Satellitensystemen des äußeren Sonnensystems war am 25. August 1989: Voyager-2 erreichte den Neptun und seine beiden bereits bekannten Monde Triton und Nereide, zusätzlich wurden sechs weitere kleinere Monde entdeckt³.

Die Gesamtdauer der Voyager-Mission beträgt mittlerweile (Stand: zweites Halbjahr 2006) fast 30 Jahre. Beide Sonden befinden sich bereits weit außerhalb der Plutobahn. Seit April 1990 wird die Voyager-Mission offiziell als **Voyager Interstellar Mission** (VIM) bezeichnet.

Voyager-1 ist mittlerweile die am weitesten von der Erde in den Raum vorgedrungene Sonde und befindet sich in einer Entfernung von mehr als 14.5 Milliarden Kilometern (> 96 AU) von der Sonne. Der Hydrazin-Treibstoff zur Lagekontrollregelung der Sonden wird noch bis etwa 2011 reichen, und die an Bord befindlichen RTG's können sogar noch bis etwa 2020 Energie zum Betrieb der Instrumente liefern, wenn die beiden Sonden fast 20 Milliarden Kilometer von der Erde entfernt sein werden⁴.

³Veröffentlichungen über die ersten Ergebnisse dieser Vorbeiflüge: (a) Voyager-1 und 2 bei Saturn von *Smith et al.* in *Science* 212, 163ff., 1981, bzw. *Science* 215, 504ff., 1982; (b) Voyager-2 bei Uranus: *Stone und Miner* in *Science* 233, 39ff., 1986; (c) Voyager-2 bei Neptun: *Stone und Miner* in *J. Geophys. Res.* 96, 18,903ff., 1991.

⁴Voyager-1 bewegt sich auf den Stern AC + 79 3888 im Sternbild Camelopardalis zu, an dem sie in ca. 40,000 Jahren in 1.6 Lichtjahren Abstand vorbeifliegen wird. Voyager-2 wird in etwa 296,000 Jahren in ungefähr 4.3 Lichtjahren Abstand den Stern Sirius passieren. Informationen auf der Webseite: <http://voyager.jpl.nasa.gov/>

4.3. Das Galileo-Projekt

4.3.1. Planung und Cruise-Phase

Noch vor den ersten erfolgreichen Vorbeiflügen der Voyager-Sonden durch das Jupitersystem war bei der NASA bereits eine Nachfolgemission in Planung, in der Jupiter und die Galileischen Monde über einen Zeitraum von 20 Monaten mit einem Orbiter und einer Atmosphären-Eintauchsonde erforscht werden sollten. Auf dem Orbiter sollte eine Reihe verbesserter fernerkundlicher Instrumente eingesetzt werden, darunter eine hoch auflösende Kamera mit mehreren Spektralfiltern, das **Solid State Imaging Instrument (SSI)**, ein abbildendes Spektrometer (**NIMS**), ein Photopolarimeter und Radiometer (**PPR**), und ein Ultraviolet-Spektrometer (**UVS**) (siehe Bild 4.2). Nach dem Entdecker der vier großen Satelliten, Galileo Galilei, wurde die Mission **Galileo** benannt. Neben umfangreichen Beobachtungen der Jupiteratmosphäre und der Dynamik des Wettergeschehens sollte das Kamera-Experiment bei den vier großen Satelliten für folgende Aufgaben eingesetzt werden (*Belton et al.*, 1992):

- Kartierung der Oberflächen der vier Galileischen Satelliten mit räumlichen Auflösungen <1 km/pxl, in mindestens einem Spektralfilter von mindestens 50 % der Oberfläche;
- Detailbeobachtungen einzelner Oberflächengebiete auf den Galileischen Satelliten mit zehnbis hundertmal höherer Auflösung als bei Voyager (bis zu 5 m/pxl);
- Kartierung räumlicher Variationen von Farbe und Albedo der Galileischen Monde mit einer räumlichen Auflösung von mindestens 2 km/pxl von 50 % jeder Oberfläche;
- Ermittlung der Oberflächenzusammensetzungen der Jupitersatelliten;
- Überwachung etwaiger zeitabhängiger Änderungen in Farbe oder Albedo auf den Galileischen Satelliten;

Ursprünglich war geplant, die Galileo-Sonde im Mai 1986 mit dem Space Shuttle in die Erdumlaufbahn zu bringen und die Sonde in eine Bahn zum Jupiter einzuschießen, bei der das Ziel nach nur wenig mehr als zwei Jahren im August 1988 erreicht worden wäre. Wegen der *Challenger*-Katastrophe am 27. Januar 1986 und der dadurch bedingten mehrjährigen Verzögerung des gesamten Space-Shuttle-Programms der NASA musste dieser Plan jedoch aufgegeben werden. Erst am 18. Oktober 1989 hob das Shuttle *Atlantis* mit der Galileo-Sonde an Bord ab, die dann von der Crew im Erdorbit ausgesetzt wurde. Da man vermeiden wollte, die Sonde mit leistungsfähigen, aber hochexplosiven Feststoffboostern in der Ladebuch des Shuttle zu transportieren, wurde sie stattdessen mit einem leichteren Flüssigraketenmotor bestückt. Dadurch musste jedoch eine stark modifizierte und wesentlich längere Flugbahn zum Jupiter unter Ausnutzung der Gravitation von Venus und Erde in Kauf genommen werden. Bei dieser als *Delta-VEEGA* (= **V**enus-**E**arth-**E**arth-**G**ravity-**A**ssist) bezeichneten Bahn sollte die Sonde einmal an der Venus und zweimal an Erde und Mond vorbeifliegen und erst nach einer Flugzeit von etwa sechs Jahren den Zielplaneten erreichen.

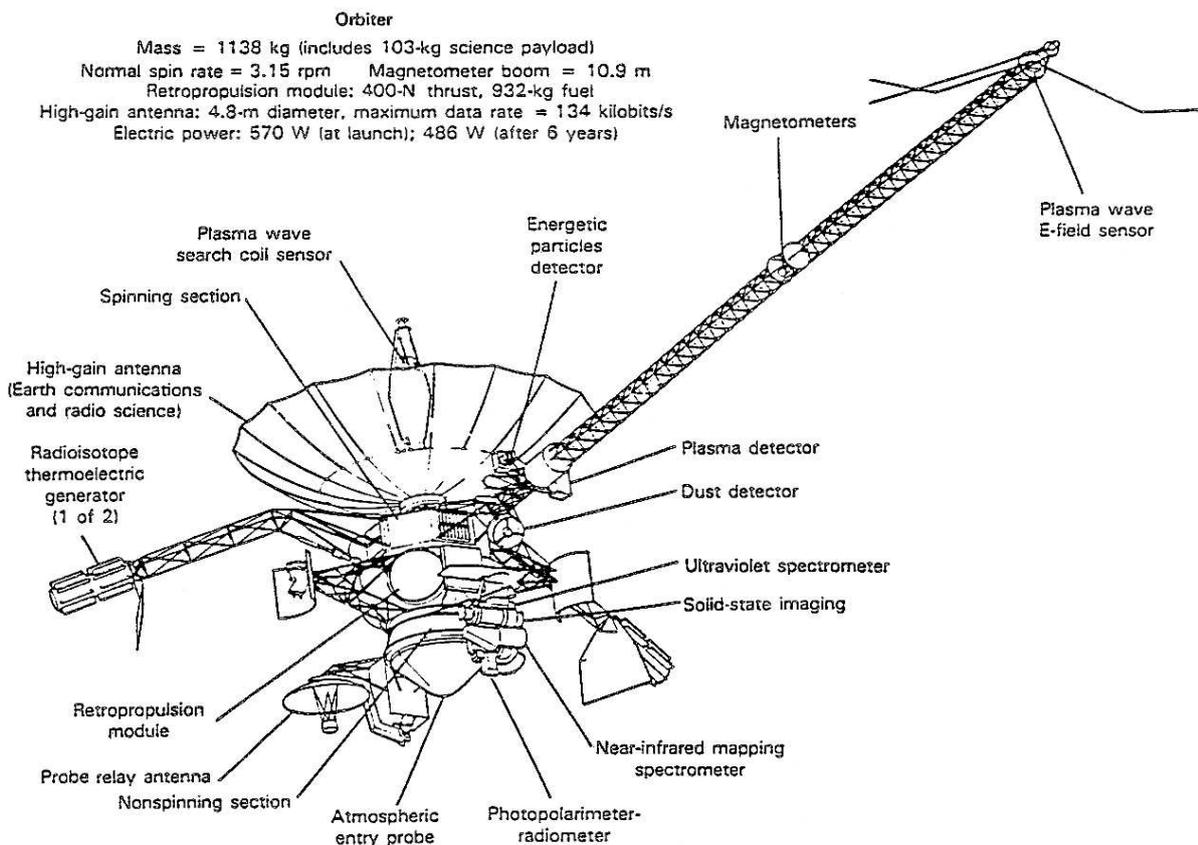


Abbildung 4.2.: Wissenschaftliche Instrumentierung der Galileo-Sonde. Die Darstellung zeigt die Konfiguration mit der noch an der Muttersonde befestigten Atmosphärenprobe.

Diese Veränderung des Missionsverlaufs eröffnete jedoch einzigartige Möglichkeiten: Bei den beiden Erde-Mond-Vorbeifügen (1990, 1992) konnte ein großer Teil der Mondoberfläche (einschließlich der Rückseite) in mehreren Spektralfiltern abgedeckt werden (z. B. Greeley et al., 1993). Zu den weiteren Highlights dieser Missions-Phase gehörten die erstmaligen Beobachtungen von Asteroiden mit einer hoch auflösenden Kamera. Die Galileo-SSI-Kamera sendete Bilddaten des 18.2 x 10.5 x 8.9 km großen Asteroiden 951 *Gaspra*, und des 59.8 x 25.4 x 18.6 km großen Asteroiden 243 *Ida*, bei dem auch dessen 1.6 km großer Mond *Dactyl* entdeckt wurde (Veverka et al., 1994; Belton et al., 1996a). Schließlich wurden am 19. Juli 1994 noch die Einschläge von drei Fragmenten (K, N und W) des 1993 entdeckten Kometen *Shoemaker-Levy 9* (SL-9) in der Jupiter-Südhälfte durch die Galileo-Kamera direkt beobachtet, Ereignisse, die von der Erde aus nicht zu sehen waren (z. B. Neukum et al., 1995).

4.3.2. Die Orbit-Tour 92-14A der nominellen Galileo-Mission

Am 11. April 1991 sollte die für die Übermittlung einer großen Zahl von Bilddaten benötigte, seit dem Start von der Erde noch zusammengefaltete *High-Gain*-Antenne (HGA) ausgefahren werden. Dieses Manöver schlug fehl, zwei bis drei der Verstärkungsstreben ließen sich nicht vollständig bewegen. Im Lauf der folgenden Monate gelangen auch alle weiteren Versuche nicht, die Streben durch Abkühlungs- und Erwärmungsphasen (Drehen der Sonde) bzw. durch den Einsatz des Motors zur Öffnung der Antenne zu lösen.

Da die *High-Gain*-Antenne nicht zur Verfügung stand, mussten die Bildaufnahmesequenzen vollkommen neu geplant werden. Die noch verfügbare *Low-Gain*-Antenne (LGA), die eigentlich zu dem Zweck vorhanden war, in der Cruise-Phase die Verbindung Galileo-Erde, und später die Verbindung zwischen der im Juli 1995 abgesetzten Atmosphärenprobe und Galileo aufrecht zu erhalten, besitzt eine wesentlich niedrigere Sendeleistung. Statt der ursprünglich geplanten 100000 Bilder hätte man damit nur etwa 2000 Bilder zur Erde übermitteln können. Einziger Ausweg hieraus waren (a) die verschiedenen Aufnahme-Modi der SSI-Kamera, (b) Methoden der Datenkompression, und (c) die maximale Ausnutzung des Tape-Recorders an Bord der Sonde (siehe hierzu Abschnitt 6.2.3, Tabelle 6.6).

Die einzelnen Arbeitsgruppen aller an Bord befindlicher Experimente⁵ einigten sich am 30. April 1992 auf die endgültige Tour der Nominellen Galileo-Mission, bezeichnet als **92-14A** mit insgesamt 11 Jupiterumkreisungen oder *Orbits*. In ihr waren vier gezielte Nahvorbeiflüge (*targeted encounters*) an Ganymed (Orbits G1, G2, G7, G8), je drei an Callisto (C3, C9, C10) und Europa (E4, E6, E11), und einer an Io (JOI) vorgesehen. Zusätzlich konnte bei jedem Orbit mindestens ein weiterer der Galileischen Satelliten aus größerer Entfernung beobachtet werden (ungezielter Vorbeiflug oder *non-targeted encounter*). Ebenso waren Beobachtungen von einigen der kleineren Monde und des Jupiterrings geplant. Diese nominelle Tour durch das Jupitersystem sollte mit dem *Jupiter Orbit Insert* (JOI) am 7. Dezember 1995 beginnen und bis zum 6. November 1997 (letzter gezielter Vorbeiflug (E11) an Europa) dauern.

Bei der Aufnahme einer Bildsequenz niedriger Auflösung im Oktober 1995 beim Anflug auf das Jupitersystem kam es zu einer für den weiteren Missionsverlauf zweiten gravierenden Fehlfunktion: Beim Rückspulen des Bandes auf dem Tape-Recorder schaltete sich der Motor für mehrere Stunden nicht mehr ab. Da nicht sicher war, inwieweit dabei das Band beschädigt worden war, entschloss man sich, die ersten und letzten 25 Wicklungen des Bandes nicht mehr zur Speicherung von Daten zu benutzen⁶. Dies hatte außerdem Folgen für die ersten geplanten Bildsequenzen während des ersten Io-Nahvorbeiflugs: Die von der Atmosphären-Einstiegssonde auf den Bandrekorder gespielten Bilddaten sollten im Dezember 1995 sicher zur Erde übermittelt werden können. Daher musste man darauf verzichten, während des JOI-Vorbeiflugs an Io am 7. Dezember 1995 Bilddaten (bis zu 6 m/pxl Auflösung) aufzunehmen. Aus dem gleichen Grund

⁵Bei diesen Gruppen handelte es sich um eine Arbeitsgruppe Magnetosphäre (MWG = *Magnetospheric Working Group*), eine Arbeitsgruppe Atmosphäre (AWG = *Atmospheric Working Group*), und eine Arbeitsgruppe Satelliten (SWG = *Satellite Working Group*).

⁶Die Bilddaten dieser ersten Bildsequenz von Oktober 1995 konnten wegen der bis dahin noch nicht gelösten Probleme mit dem Bandrekorder nie zur Erde übertragen werden.

Orbit	Datum	Targeted	Auflösungen km/pxl	Non-targeted	Auflösungen km/pxl
G1	27. Juni 1996 ⁽¹⁾	Ganymed	13 - 0.011	Europa	1.6
G2	6. Sep. 1996	Ganymed	0.228 - 0.045	Callisto Europa	17 - 4.3 6.9
C3	4. Nov. 1996	Callisto	10 - 0.029	Europa Io	0.85 - 0.43 4.1 - 2.5
E4	19. Dez. 1996	Europa	1.2 - 0.021	-	-
E6⁽²⁾	20. Feb. 1996	Europa	1.7 - 0.022	Ganymed Callisto	14.4 - 3.6 9.4
G7	5. April 1997	Ganymed	0.554 - 0.145	Europa Callisto	3.2 - 0.388 6.4
G8	7. Mai 1997	Ganymed	0.936 - 0.143	Callisto	2.32 - 0.678
C9	25. Juni 1997	Callisto	1.1 - 0.14	Ganymed Europa	4.0 - 0.84 12.6
C10	17. Sep. 1997	Callisto	0.428 - 0.089	Europa Ganymed	14.7 - 7.3 17
E11	6. Nov. 1997	Europa	0.289 - 0.033	Callisto	13.9

Tabelle 4.1.: Gezielte (*targeted*) und ungezielte Vorbeiflüge (*non-targeted encounter*) an den Galileischen Monden während der Nominellen Mission und ihre jeweiligen räumlichen Auflösungen. Hier nicht aufgeführt sind SSI-Beobachtungen niedriger Auflösung (> 5 km/pxl) zur Überwachung vulkanischer Aktivität auf Io, Beobachtungen der kleineren Monde sowie des Jupiterrings. ⁽¹⁾Der erste Ganymedvorbeiflug war ursprünglich für den 4. Juli 1996 geplant. ⁽²⁾Während des fünften Orbits (E5) wurden keine Bilddaten aufgenommen. Callisto als Hauptuntersuchungsobjekt dieser Arbeit ist durch Fettdruck hervorgehoben (ebenso in den beiden folgenden Tabellen).

konnte eine räumlich hochaufgelöste Bildsequenz der Europa-Südpolregion nicht durchgeführt werden.

Wegen der genannten Einschränkungen bei der Datenspeicherung und -übertragung wurden die Beobachtungsziele bei den Monden neu definiert (*Carr et al., 1995*):

1. Während der nominellen Orbit-Tour sollten bei allen Orbits Farbbilddaten niedrigerer Auflösung von Io zur Untersuchung des aktiven Vulkanismus und von Veränderungen seit Voyager aufgenommen werden (*Io surface monitoring*).
2. Europa wurde durch die Voyager-Kameras lediglich mit 2 km/pxl abgedeckt. Durch die SSI-Kamera sollten insbesondere die tektonischen Formen der Oberfläche, eventuelle Anzeichen von Eisvulkanismus in der Vergangenheit oder Gegenwart, und die Kraterverteilung untersucht werden.

3. Ganymed wurde durch die Voyager-Kameras gut abgedeckt. Bei den geplanten Beobachtungen durch die SSI-Kamera konzentrierte man sich daher auf Detailaufnahmen der tektonischen Formen, der Grenze zwischen dem dunklen und dem hellen Gebiet, und auf einzelne markante Einschlagsstrukturen. Ferner sollte nach eventuellen Anzeichen von Eisvulkanismus gesucht und die von den Voyager-Kameras hinterlassenen Lücken geschlossen werden. Farbaufnahmen waren nur in relativ niedriger räumlicher Auflösung geplant.
4. Durch Voyager wurde nur etwa die Hälfte der Callisto-Oberfläche mit Bilddaten unterschiedlicher Qualität abgedeckt. Die SSI-Kamera sollte auf Gebiete ausgerichtet werden, die von Voyager überhaupt noch nicht erfasst wurden, z. B. die Südpolregion. Einige der Hauptbeobachtungsziele für Bilddaten sehr hoher Auflösung waren die großen Einschlagbecken Valhalla und Asgard und einige besondere Kraterformen. Ferner sollte nach Anzeichen endogener Aktivität und nach weiteren noch unbekanntem Ringbecken auf der alten Callisto-Oberfläche gesucht werden.

In Tabelle 4.1 sind alle während der nominellen Galileo-Mission durchgeführten Vorbeiflüge und ihre Beobachtungsziele zusammengestellt.

4.3.3. Die Galileo Europa Mission (GEM)

Die während der nominellen Missionsphase von Europa gelieferten Bilddaten ließen den Schluss zu, der Satellit könnte rezent noch aktiv sein und möglicherweise einen Wasserozean unter seiner Eiskruste besitzen. Daher entschloss sich das Galileo-Projektmanagement, diesen Mond zum Schwerpunkt weiterer gezielter Vorbeiflüge zu machen. Diese Verlängerung der Galileo-Mission wurde mit **Galileo Europa Mission (GEM)** bezeichnet. In unmittelbarem Anschluss an das Ende der Nominellen Mission (Vorbeiflug E11 an Europa am 6. November 1997) wurden daher acht weitere Vorbeiflüge an diesem Satelliten mit Bilddaten bis zu 6 m/pxl Auflösung geplant (Orbits E12 bis E19; Tabelle 4.2). Außerdem konnten gegen Ende der GEM die bisher noch nicht durchgeführten gezielten Vorbeiflüge an Io mit Aufnahme hoch aufgelöster Bilddaten stattfinden. Vier an die Europa-Vorbeiflüge anschließende Orbits (C20 bis C23) dienten der Perijov-Absenkung der Galileo-Sonde, um weiter ins innere Jupitersystem vorzustoßen. Während der Orbits C20 und C21 war Callisto erneut das Ziel zweier naher Vorbeiflüge mit räumlich sehr hoch aufgelösten Bilddaten.

In dieser Missionphase traten weitere technische Probleme auf. Durch *safing events* in den Orbits E16 und E18, verursacht durch den Absturz des Bordcomputers, gingen viele der hoch aufgelösten Bildsequenzen verloren. Deshalb entwickelte man spezielle Software, um solche *safing events* im weiteren Verlauf der Mission zu verhindern. Die an die vier Callisto-Vorbeiflüge folgenden beiden Vorbeiflüge I24 und I25 hatten schließlich Io zum Ziel mit Bildaufnahmesequenzen in sehr hoher Auflösung. Beim I24-Vorbeiflug kam es zu einer weiteren Störung, wahrscheinlich als Folge der hohen Strahlenbelastung: Bei den im so genannten AI8-Modus (siehe Tabelle 6.6, Seite 80) aufgenommenen Bilddaten waren Teile der linken und rechten Bildszene ineinanderkopiert und konnten erst durch ein aufwändiges statistisches Verfahren soweit rekonstruiert werden, dass die Daten ausgewertet werden konnten. Ab I24 wurden daher der AI8-Modus vermieden.

Orbit	Datum	Targeted	Auflösungen km/pxl	Non-targeted	Auflösungen km/pxl
E12	16. Dez. 1997	Europa	1.4 - 0.006	Ganymed	0.16
E13⁽¹⁾	13. Feb. 1998	-	-	-	-
E14	29. März 1998	Europa	1.4 - 0.02	Ganymed Io	18.7 - 9.3 2.3
E15	31. Mai 1998	Europa	0.245 - 0.028	-	-
E16	21. Juli 1998	Europa ⁽²⁾	-	-	-
E17	26. Sep. 1998	Europa	4.1 - 0.039	-	-
E18	22. Nov. 1998	Europa ⁽²⁾	-	-	-
E19	1. Feb. 1999	Europa	0.9 - 0.063	-	-
C20	5. Mai 1999	Callisto	0.6 - 0.10	Ganymed	9.0
C21	30. Juni 1999	Callisto	0.015	Io	3.7 - 1.3
C22	14. Aug. 1999	-	-	Amalthea	5.9 - 5.4
C23⁽¹⁾	16. Sep. 1999	-	-	-	-
I24	11. Okt. 1999	Io	> 5 - 0.009	-	-
I25	26. Nov. 1999	Io	0.26 - 0.14	Europa Amalthea	0.9 - 0.09 3.78

Tabelle 4.2.: Gezielte und ungezielte Vorbeiflüge an den Galileischen Monden während der *Galileo Europa Mission (GEM)* und ihre jeweiligen räumlichen Auflösungen. Nicht aufgeführt sind SSI-Beobachtungen niedriger Auflösung zur Überwachung des Io-Vulkanismus und des Jupiterrings. ⁽¹⁾In E13 und C23 wurden keine Bilddaten aufgenommen. ⁽²⁾Wegen einer Fehlfunktion (*safing event*) gingen in E16 und E18 viele (in E18 alle) geplanten Bildsequenzen verloren.

4.3.4. Die Galileo Millenium Mission (GMM)

Der letzte Orbit der GEM (E26) am 4. Januar 2000 hatte erneut Europa zum Ziel. Er war gleichzeitig der Beginn einer weiteren Missionsverlängerung, der **Galileo Millenium Mission (GMM)**, die die letzte Missionphase darstellte und im Januar 2003 endete. Io wurde als Schwerpunkt dieser Missionsphase mit insgesamt vier weiteren Vorbeiflügen bestimmt. Je ein Vorbeiflug fand an Europa (E26) und Callisto (C30) statt, zwei weitere an Ganymed (G28, G29). Alle weiteren Informationen finden sich in Tabelle 4.3.

Die SSI-Kamera hat bis zum Ende der Mission im Januar 2003 die ihre ursprüngliche Auslegung weit übersteigende Strahlenbelastung gut überstanden und lieferte, von einigen Ausnahmen (E16, E18, I24, I33) abgesehen, ausgezeichnete Bilddaten. Während des Orbits G29 ergab sich die einzigartige Gelegenheit, das Jupitersystem mit den Instrumenten zweier Raumsonden zu erforschen: Zum Neujahrswchsel 2000/2001 flog die Saturn-Sonde **Cassini** in etwa 10 Millionen Kilometer an Jupiter vorbei. Für Detailuntersuchungen der Monde war diese Entfernung zu groß, aber es konnten spektakuläre Bilddaten der Jupiteratmosphäre aufgenommen und die Dynamik der Atmosphäre in Filmen festgehalten werden.

Orbit	Datum	Targeted	Auflösungen km/pxl	Non-targeted	Auflösungen km/pxl
E26	4. Jan. 2000	Europa	0.109 - 0.011	Io Amalthea Thebe Metis	4 - 3.4 2.56 1.93 2.93
I27	22. Feb. 2000	Io	> 3 - 0.01	-	-
G28	21. Mai 2000	Ganymed	0.56 - 0.015	Europa	18.4 - 13.6
G29	29. Dec. 2000	Ganymed	0.78 - 0.68	-	-
C30	25. Mai 2001	Callisto	11.6 - 0.005	Ganymed Io	12.2 - 3.6 4.0 - 3.6
I31	5. Aug. 2001	Io	> 19.6 - 0.004	Callisto Amalthea	6.4 12.7
I32	15. Okt. 2001	Io	10.1 - 0.012	Amalthea	9.25
I33	17. Jan. 2002	Io ⁽¹⁾	6.7 - 0.025	Europa Amalthea Thebe	19.5 10.7 - 9.9 9.05
A34	4. Nov. 2002	Amalthea	-	-	-

Tabelle 4.3.: Gezielte und ungezielte Vorbeiflüge an den Galileischen Monden während der *Galileo Millenium Mission (GMM)*. ⁽¹⁾In I33 kam es erneut zu einem *safing event* und damit zum Verlust der gesamten hoch aufgelösten Io-Sequenz. Beim unwiderruflich letzten Vorbeiflug an Amalthea wurden keine Bilddaten mehr aufgenommen.

Nach dem endgültig letzten Vorbeiflug der Galileo-Sonde am 4. November 2002 an einem der Monde, Amalthea, bei dem leider keine Bilddaten mehr aufgenommen wurden, war Mitte Januar 2003 das offizielle Ende der Galileo-Mission. Am 21. September 2003 wurde die Galileo-Sonde kontrolliert zum Absturz gebracht und verglühte in der Jupiteratmosphäre.

