

Bernd Leitenberger



Mit Raumsonden zu den Planetenräumen

Neubeginn bis Heute 1993 bis 2018



Edition Raumfahrt kompakt

Mein besonderer Dank geht
an die beiden Korrekturleser

Joachim Uhlig
und
Mario Remler

Vorwort

Dieser zweite Band über die Chronik der Erforschung des Sonnensystems mit Raumsonden schließt zeitlich an Band 1 (ISBN: 978-3-74603-680-9) an. Beide Bücher sind eine Gesamtausgabe, die aus praktischen Gründen (die Gesamtseitenzahl übersteigt die mögliche Maximalzahl) in zwei Bände aufgeteilt wurde. Daher kann ich mich in diesem Vorwort kurz fassen und verweise auf das Vorwort von Band 1.

Sie finden in Band 1 eine Einleitung über die Funktionsweise von Instrumenten, Himmelsmechanik und Steuerung der Sonden, die ich hier nicht wiederhole. Sie ist aber nötig zum Verständnis, wofür ein Instrument genutzt wird.

Eine Abweichung gibt es bei dem Aufbau des Buchs. Im ersten Band unterschied ich nach Nationen. Das war sinnvoll, weil es Programme mit mehreren Sonden gab und sonst Starts der USA und Russland kunterbunt durcheinander gewürfelt wären. Das macht im zweiten Band keinen Sinn. Zum einen gibt es Russland als Counterpart nicht mehr – nur zwei Starts anstatt über Hundert im ersten Band. Zum anderen ist die Zeit der großen Programme vorbei. Heute gibt es nur noch Einzelmissionen. Jede Mission kann daher in einem Kapitel abgehandelt werden. Die Ordnung ist streng chronologisch. Wie im Band 1 liefert der Anhang noch eine Kurzzusammenfassung der Starts und weitere nützliche Fakten.

Analog enthält dieses Buch nicht alle Körper, die das Erdgravitationsfeld verließen. Zur Diskussion, was

aufgenommen wurde, verweise ich auf das Vorwort von Band 1. Das Kriterium ist, das sie entweder einen Körper des Sonnensystems außer Erde und Sonne erforschen oder das interplanetare Medium. Das schließt Sonnenobservatorien (SOHO, Stereo), Weltraumwetterfrühwarnsatelliten (ACE, Wind, DSCOVR) oder in eine Sonnenumlaufbahn oder Librationspunkte gelangte astronomische Satelliten (Kepler, Spitzer, Herschel, Planck) aus.

Ruit, im Januar 2018.

Bernd Leitenberger

Inhaltsverzeichnis

Raumsonden

Clementine

NEAR Shoemaker

Mars Global Surveyor (MGS)

Mars 96

Mars Pathfinder (MPF)

Cassini

Huygens

Lunar Prospector

Nozomi

Deep Space 1 (DS-1)

Mars Climate Orbiter (MCO)

Mars Polar Lander (MPL)

Stardust

2001 Mars Odyssey

Genesis

CONTOUR

Hayabusa

Mars Express

Beagle 2

Mars Exploration Rovers (MER)

SMART-1

Rosetta

Philae
MESSENGER
Deep Impact
Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)
Venus Express
New Horizons
Phoenix
Kaguya
Dawn
Chang'e-1
Chandrayaan 1
Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)
LCROSS
Akatsuki
Chang'e-2
Juno
GRAIL
Phobos-Grunt
Yinghuo 1
Mars Science Laboratory (MSL)
LADEE
Mars Orbiter Mission (MOM)
MAVEN
Chang'e-3
Chang'e-5 T1
Hayabusa 2
Exomars Trace Gas Orbiter
Schiaparelli
OSIRIS-REx

Chandrayaan 2

Insight

Parker Solar Probe

BepiColombo

Anhang

Tabelle aller Starts

Weitere Starts

Kosten von Raumsonden

Erfolgsstatistik

Raumsonden

Die Periode von 1994 bis 2018 ist von mehreren Faktoren geprägt. Seitens der USA ist es eine Periode der Renaissance der planetaren Raumfahrt, nach einem drastischen Rückgang der Starts ab 1978 durch Regierungen, die wenige Raumsonden bewilligten. Dies lag auch am neuen Kurs der NASA, die unter Daniel Goldin das Discovery Programm initiierte, mit dem Ziel, mehr und dafür preiswertere Missionen zu starten. Es sollte der Prozess verschlankt werden und nicht zu jeder Tonne Raumsonde auch eine Tonne Papier (Dokumentationen und Testprotokolle) erstellt werden. Das Discoveryprogramm gibt es bis heute. Die finanzielle Ausstattung der Projekte ist nach dem spektakulären Verlust von mehreren Raumsonden aber wesentlich besser als in den ersten Jahren. Seit 1979 gibt es nur noch Einzelmissionen, keine Doppelmissionen oder gar Kleinserien wie bei Ranger, Surveyor oder Lunar Orbiter.

Russland, das von 1958 bis 1988 die meisten Starts durchführte - über 100 Sonden - hat sich vom Zusammenbruch der Wirtschaft nach dem Ende der Sowjetunion bis heute nicht erholt. In 25 Jahren wurden gerade einmal zwei Missionen gestartet. Beide Missionen scheiterten schon, bevor sie die Erde verließen.

Dafür rückten ESA und JAXA auf. Sie starteten nun erheblich mehr Raumsonden als in den Achtzigern, in denen beide Raumfahrtagenturen mit den Starts begannen.

Neue Nationen kamen hinzu. Indien mit seinen ersten beiden Raumsonden und China, das sich vor allem auf die Erforschung des Mondes konzentriert. Mit den Vereinigten Arabischen Emiraten wird 2020 die nächste Nation hinzukommen.

Ein zweiter Gesichtspunkt, den es schon in den Achtzigern entwickelte, ist die internationale Zusammenarbeit. Heute ist es normal, dass eine Raumsonde Experimente aus mehreren Ländern trägt. Auch die Sonden werden teilweise in mehreren Ländern gefertigt, so BepiColombo als Europäisch-Japanische Mission.

Redaktionsschluss für alle Angaben war der 1. Januar 2018.

Clementine

Die allerersten fünf Raumsonden der USA wurden vom Militär entwickelt: Pioneer 0 bis 2 von der Air Force, Pioneer 3 und 4 von der Army. Seitdem ist die NASA für das wissenschaftliche Programm verantwortlich. Mit der Geburt des SDI-Programms kam es wieder zur Zusammenarbeit der zivilen Weltraumbehörde mit dem Militär. Ziel von SDI war es anfliegende Interkontinentalraketen zu zerstören, bevor sie die USA erreichten. Das überstieg die zur Verfügung stehende Technologie bei Weitem. Es musste vieles erst entwickelt und getestet werden, darunter auch Annäherungssensoren. Das Militär fand heraus, das man diese Sensoren anstatt mit einer Rakete auch mit einem Himmelskörper testen könnte. Ebenso sollten die SDI-Satelliten fähig sein, autonom zu navigieren. Dies konnte man beim Vorbeiflug an einem Asteroiden testen. So kam es zur Zusammenarbeit mit der NASA. Die NASA stellte ihr Deep Space Network für die Kommunikation zur Verfügung und durfte im Gegensatz auf der Raumsonde Experimente installieren.

Offiziell hieß die Sonde „**D**eep **S**pace **P**rogram **S**cience **E**xperiment (DSPSE)“. Der Name Clementine kam von der Ballade „My Darling Clementine“. Clementine ist ein Vorläufer des Discoveryprogramms. Sie wurde in nur 22 Monaten mit Kosten von 75 Millionen Dollar entwickelt. Clementine hatte die Form eines achteckigen Prismas. Die Instrumente und die Hauptgewinnantenne waren fest montiert. Das Fehlen von beweglichen Teilen senkte die Kosten bei der Entwicklung. Die Sonde erprobte neue Technologien, so neben dem bewährten MA 1750A Prozessor

einen R3081-Prozessor von MIPS mit höherer Rechenleistung, die Komprimierung von Daten nach der Methode der **D**iskreten **C**osinus-**T**ransformation (DCT, Grundlage des JPEG-Standards). Sie erlaubte im Mittel eine Komprimierung um den Faktor 5,5, verglichen mit maximal 2, bei verlustfreier Komprimierung. Als erste Raumsonde nutzte Clementine Star-Tracker-Kameras, um ihre Lage im Raum zu erfassen. Das sind Weitwinkelkameras, die den Sternenhimmel aufnehmen, im Bild die hellsten Sterne suchen und ihre relativen Positionen mit einem Katalog vergleichen. Damit weiß Clementine, wohin die Kamera schaut und dadurch, wie sie ausgerichtet ist. Neu war die Verwendung von Halbleiterbausteinen für den Massenspeicher anstatt einem Bandlaufwerk. Der Speicher von 2 GBit Kapazität bestand aus 4 Mbit RAM-Bausteinen. Er ist potenziell zuverlässiger, da ohne die Mechanik eines umgespulten Bandes die Ausfallwahrscheinlichkeit viel geringer ist.

Neben den geheimen Sensoren des SDI-Programms führte Clementine ein Strahlenmessgerät mit, um die Strahlenbelastung im Van-Allen-Gürtel zu messen. Von verschiedenen Halbleiterelementen, wie EPROMS, wurde das Verhalten bei Strahlenexposition geprüft. Dieses Experiment befand sich auf der letzten Stufe, die häufiger als Clementine den Van-Allen-Gürtel passiert.

Die Experimente spielten bei der Mission nicht die Hauptrolle, so war die instrumentelle Nutzlast nur 7,62 kg schwer. Es gab vier Kameras. Eine empfindlich im sichtbaren Bereich mit fünf Filtern, eine zweite im nahen Infraroten und eine dritte im langwelligen Infrarot. Sie hatten keine hohe Auflösung. Die IR-Aufnahmen waren die Ersten, die man vom Mond in diesem Spektralbereich anfertigte. Eine vierte, hochauflösende Kamera war Bestandteil des

Zielsuchprogramm, wurde aber auch beim Mond zur Kartierung eingesetzt.

Ein LIDAR (Laser Image **D**etection **a**nd **R**anging) Experiment nutzte einen Laser als Abstandsmesser. Damit wurden Höhenprofile des Mondes gewonnen und die Bahn der Sonde genauer vermessen.

Mit den Sendern der Sonde wurde experimentell ein bistatisches Radar-Experiment durchgeführt. Dabei sandte die Sonde Impulse auf die Mondoberfläche. Radarstationen auf der Erde erfassten die reflektierten Signale. Man vermutete in tiefen Katern nahe der Pole Wassereis. Es würde sich durch die Reflexion verraten.

Gestartet wurde Clementine mit einer Titan II. Das US-Militär hatte begonnen, die ICBM aus den frühen Sechzigern auszumustern und nutzte sie nun als Trägerraketen. Sie wurde durch einen Star 37FM Feststoffantrieb ergänzt, da die Sonde sonst nicht den Mond erreicht hätte. Der Start wurde vom US-Militär durchgeführt. Clementine war die erste Raumsonde, die von der Vandenberg Air Force Base gestartet wurde.

Die Oberstufe brachte Clementine nicht ganz bis zum Mond, da die Oberstufe in einer Erdumlaufbahn verblieb. Die an dem Star 37FM angebrachten Strahlenmessgeräte maßen während eines Jahres bei mehrfachen Durchläufen des Van-Allen-Gürtels die Strahlenbelastung. Nach einem Umlauf hob Clementine mit ihrem Haupttriebwerk die Bahn an. Nach einem weiteren Umlauf schwenkte sie in den Mondorbit ein. Die elliptische Mondumlaufbahn wurde gewählt, um den Mond mit möglichst geringem Treibstoffverbrauch wieder verlassen zu können.

Es gab drei Kartierungszyklen von je einem Monat (Montag) Dauer. Im ersten Zyklus lag der mond nächste Punkt der Bahn bei 30 Grad Nord, im Zweiten bei 30 Grad Süd. Nur nahe des Perilunäums konnten Bilder gemacht werden. Um möglichst viel der Mondoberfläche zu kartieren, musste daher der mond nächste Punkt verschoben werden. Im dritten Zyklus wurden Lücken geschlossen, die es nach den ersten beiden Zyklen noch gab. Zusätzlich wurden jetzt die bistatischen Radarexperimente durchgeführt. In drei Monaten hatte Clementine so das Gebiet zwischen 60 Grad Nord und Süd erfasst, rund 86 % der Mondoberfläche.

Am 3.5.1994 zündete Clementine erneut ihr Haupttriebwerk und schwenkte in eine 24.326×384.400 km Erdumlaufbahn ein. Geplant waren nun zwei Bahnkorrekturen, um eine 19.134×554.000 km Bahn zu erreichen. In dieser Bahn hätte Clementine am 27.5.1994 den Mond in 7.342 km Entfernung passiert. Der Mond hätte sie beschleunigt und Clementine wäre auf eine Sonnenumlaufbahn gelangt.

Am 31.8.1994 sollte Clementine den Asteroiden Geographos, ein $5 \times 2 \times 1,5$ m großer Asteroid, der regelmäßig die Erdbahn kreuzt, in einem Abstand von 100 km passieren und dabei die Annäherungssensoren erproben. Doch bei der ersten Bahnkorrektur gab es einen Computerfehler, den man dem neuen R3081 Prozessor zurechnete. Ein Triebwerk schaltete nicht ab. Bis man es durch ein Bodenkommmando stoppen konnte, hatte Clementine nahezu den ganzen Treibstoffvorrat verbraucht und rotierte mit 80 U/Min um ihre Achse.

Ein Weiterflug zu Geographos war mit dem verbliebenen Treibstoff nicht mehr möglich. Man nutzte den Mondvorbeiflug, um Clementine in eine lang gestreckte Erdumlaufbahn zu bringen. Schon im Juni 1994 fiel die

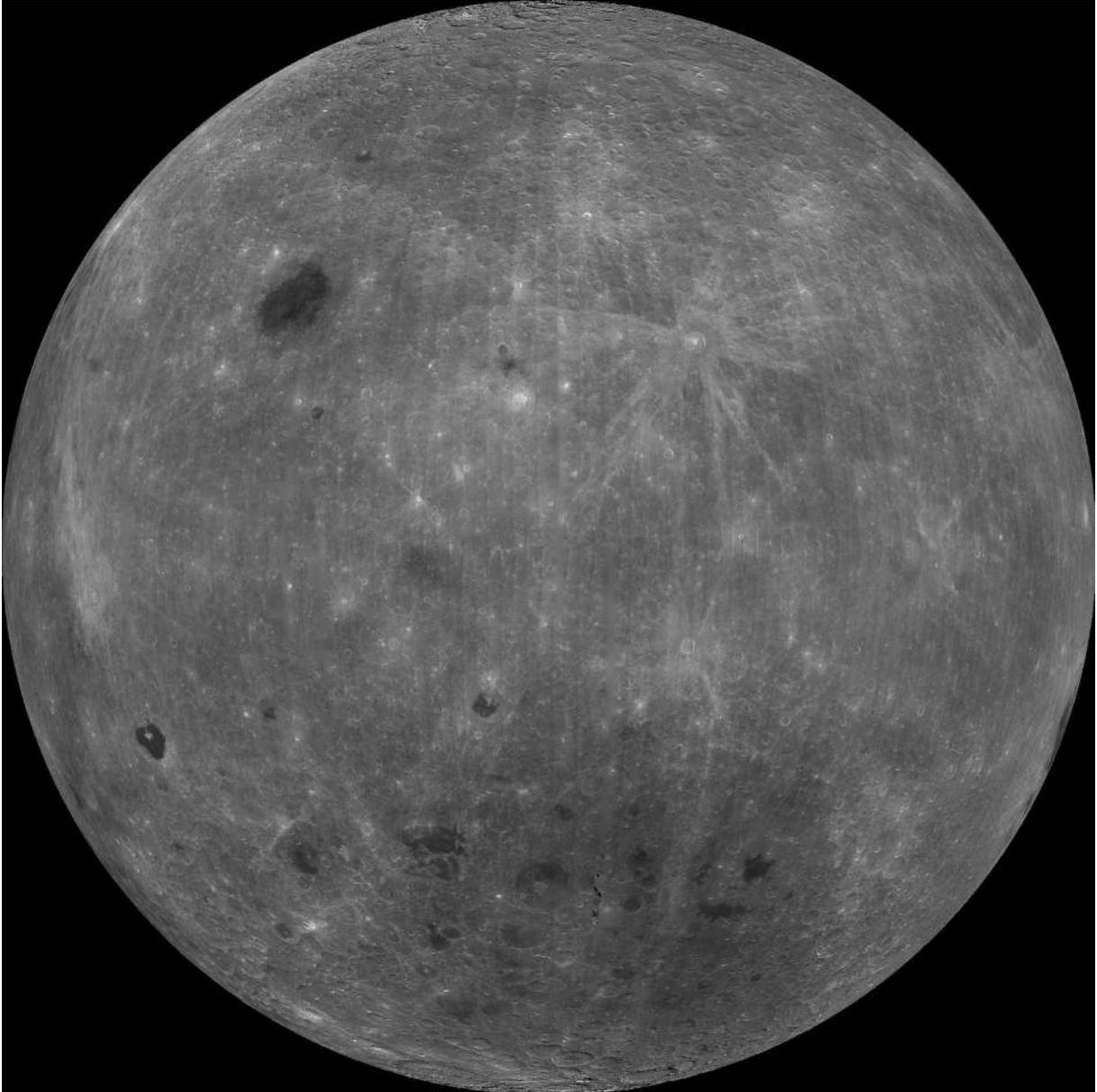
Leistung der Solarpaneele aus unbekanntem Grund stark ab und man musste alle Experimente abschalten. Am 20.7.1994 versagte schließlich der Hauptcomputer und Clementine verstummte. Es gab Pläne, die Sonde nachzubauen und als Sekundärnutzlast mit einer Ariane 4 zu starten, ebenso Ideen für eine SDI-Nachfolgemission, bei dem man zwei Asteroiden nutzen wollte, um Projektile auf sie abzuschießen. Der frühe Ausfall der Sonde bewirkte aber, dass man diese Projekte nicht weiter verfolgte. Das SDI-Programm wurde schon 1993, vor dem Start, von Präsident Clinton beschnitten und dann in ein rein bodengestütztes Programm umgewandelt. So blieb Clementine die einzige Sonde des US-Militärs.

Datenblatt Clementine	
Start:	25.1.1994 mit Titan II (23G-11) in eine 277 × 126.608 km Bahn mit einer Inklination von 66,67 Grad
Ankunft:	19.2.1994 in einem 429 × 2.924 km Mondorbit 5.5.1994 Verlassen des Mondorbits 27.5.1994 Mondvorbeiflug in 7.342 km Entfernung 31.8.1994 Vorbeiflug an Geographos (geplant)
Missionsende:	20.7.1994
Mission:	Mondkartierung Tests von SDI-Technologien
Gewicht:	Startgewicht: 430 kg, Trockengewicht: 228 kg
Abmessungen:	1,14 m Durchmesser, 1,88 m Höhe
Instrumente:	Sechs Experimente und ein Technologieexperiment im Gesamtgewicht von 7,62 kg:
	<ul style="list-style-type: none"> • Clementine Charged Particle Telescope: Misst die Energie. Fluss und Verteilung von Protonen und Elektronen im Magnetschweif der Erde. Gewicht 0,21 kg. • Clementine Ultraviolett / Visible CCD Camera (UV/Vis): Objektiv mit 46 mm Durchmesser f/2. Blickfeld: 4,2 × 5,6 Grad. Detektor: 288 × 288 Pixel CCD. Auflösung: 25 m aus 100 km Entfernung. Fünf Filter zwischen 415 und 1.000 nm Wellenlänge. Gewicht 0,41 kg. • Clementine Near-Infrared CCD Camera (NIR): Teleskop mit 29 mm Durchmesser, f/3.33. Blickfeld 5,6 × 5,6 Grad. Detektor 256 × 256 Pixel CCD. Auflösung 40 m auf 100 km Entfernung. Sechs Filter zwischen 1.100 und 2.800 nm Wellenlänge. Gewicht 1,92 kg. • Clementine Long-Wavelength Infrared Camera (LWIR): Teleskop mit 29 mm Durchmesser, f/2,67. Blickfeld 1,1 × 1,1 Grad. 128 × 128 Pixel FPGA HgCdTe-Detektor. Empfindlich zwischen 8.000 und 9.500 nm Wellenlänge. Auflösung 14,3 m aus 100 km Entfernung. Gewicht 2,1 kg. • Clementine High-Resolution Camera (HIRES): Teleskop mit 131 mm Durchmesser, f/9,5. Blickfeld 0,3 × 0,4 Grad. Detektor S2-Photokathode mit 288 × 384 Pixeln. Auflösung 1,8 m aus 100 km Entfernung. Vier Filter zwischen 415 und 750 nm Wellenlänge. Gewicht 1,3 kg, • Clementine Laser Image Detection and Ranging: Laser mit Impulsen bei 523 und 1064 nm Wellenlänge. Höhengenaugigkeit 40 m, Durchmesser des Lasers auf dem Mond 100 m. Eine Messung alle 1 bis 2 km. Gewicht 2,37 kg. • Bistatisches Radar: Nutzt den 6 W Transmitter der Sonde als

	<p>Radarsender.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Startracker-Kameras: technologisches Experiment: Nehmen ein Bild des Sternenhimmels von 28,9 × 43,4 Grad auf und bestimmen die Position von Sternen bis zur 6-ten Größenklasse. Gewicht je 0,29 kg (zwei Kameras).
Ergebnisse:	<p>Kartierung von 86 % der Mondoberfläche mit 108 bis 325 m Auflösung, im Mittel 200 m. 0,4 % der Oberfläche mit Auflösung von 7 bis 20 m erfasst 70.000 LIDAR-Messungen Wasservorkommen von 120.000 m³Volumen an den Polen entdeckt.</p>
Bilder:	<p>1,9 Millionen Bilder von UVVis/LIR, davon 1 Million für die Kartierung 620.000 Bilder von HIRES 320.000 Bilder von LWIR</p>
Kosten:	<p>113 Millionen Dollar, davon 75 Millionen Dollar Raumsonde, 5 Millionen Dollar Missionsdurchführung, 33 Millionen Dollar Start</p>



1. Abbildung: Nachbau von Clementine mit Star 37FM Oberstufe



2. Abbildung: Fotomosaik der Mondrückseite aus Clementine-Bildern

NEAR Shoemaker

Near (**NEAR Earth Asteroid Rendezvous**) war die erste Sonde des von NASA Administrator Daniel Goldin 1992 ins Leben gerufenen Discoveryprogramms. Schon früher gab es in der NASA die Vision von kleineren Raumsonden mit kürzeren Entwicklungszeiten und geringeren Kosten. Der Verlust des Mars Observers (Band 1, S. 198) forcierte diese Entwicklung. Das Discovery Programm unterscheidet sich von den letzten Missionen nicht nur im Preis, sondern auch im Zeitrahmen. NEAR sollte in 36 Monaten mit einem festen Budget von 150 Millionen Dollar (nur Raumsonde) umgesetzt werden. In gewisser Weise war dies eine Renaissance des Pioneer-Programms, das parallel zum Marinerprogramm lief. Daniel Goldin gab die Devise aus: „Faster, Better, Cheaper“.

NEAR ist ein positives Beispiel für eine Raumsonde des Discoveryprogramms. Natürlich kann man eine Raumsonde billiger als Galileo oder dem Mars Observer bauen, wenn diese weniger leistet und eine kleinere Trägerrakete braucht. NEAR sollte den erdnahen Asteroiden 433 Eros besuchen. Ein Asteroid hat keine Atmosphäre. Instrumente, die diese untersuchen, können entfallen. Ebenso erwartet man kein Magnetfeld, sodass NEAR auch keine Instrumente zur Untersuchung der Plasmaumgebung benötigt. Damit fielen die meisten Instrumente, die größere Missionen trugen, weg. Man beschränkte sich auf das Sinnvolle und Notwendige. Damit war ein Asteroidenorbiter finanziell umsetzbar. Die NASA hätte wohl kaum 1 Milliarde Dollar nur für die Untersuchung eines Asteroiden ausgegeben.

NEAR ist ein Beispiel für den Trend, der sich durch den ganzen zweiten Band zieht: Nachdem bisher die Planeten untersucht wurden, rücken nun die kleineren Körper ins Rampenlicht der Forschung. Galileo hatte schon Asteroiden passiert, doch bei der geringen Größe dieser Körper dauert die „heiße Phase“ der Begegnung nur Minuten bis Stunden und entsprechend wenige Daten werden gewonnen. NEAR sollte daher einen Asteroiden umrunden. 13 der 56 Raumsonden in diesem Band passierten oder umrundeten einen oder mehrere Kometen oder Planetoiden. Im europäischen Sprachgebrauch ist die Bezeichnung Planetoid (kleiner Planet) üblich. Im Amerikanischen, wo alles größer ist, dagegen Asteroid (kleiner Stern). Ein Meteorit ist ein sehr kleiner Planetoid, der auf der Erde niedergeht und dabei meist verglüht.

Das Konzept von NEAR gab es seit Längerem. Es lief unter der Bezeichnung ACE (**A**dvanced **C**omet **E**xplorer) und wurde bereits 1989 erarbeitet. ACE sollte allerdings Kometen anfliegen. Als die NASA zu Eingaben für die erste Discovery-Runde einlud, war ACE zu teuer. Die Ausschreibung ist ebenfalls eine Neuerung: Eine Mission wird nicht vom JPL vorgeschlagen, sondern es gibt eine förmliche Ausschreibung mit festem Budget und verschiedene Gruppen können Vorschläge einreichen. Die NASA selektiert in der ersten Runde die aussichtsreichen Kandidaten aus. Sie erhalten eine Vorabförderung, um das Konzept weiter auszuarbeiten. Danach selektiert man in einer zweiten Runde eine bis zwei Missionen. ACE sollte nun Asteroiden anfliegen, was die Kosten deutlich senkte. NEAR wurde gemeinsam vom Goddard Zentrum der NASA und der John Hopkins-Universität entwickelt.

NEAR ist, um die Kosten zu reduzieren, eine leichte Sonde. Sie wiegt beim Start nur ein Drittel des Mars Observers. Um das Risiko zu reduzieren, wurde, wo es ging, auf bewegliche

Teile verzichtet. So ist die Hochgewinnantenne fest eingebaut, die Instrumente ebenfalls. Die Solararrays müssen daher um bis zu 40 Grad gedreht werden, damit sie zur Sonne zeigen, wenn die Sonde mit der Antenne auf die Erde ausgerichtet wird. Die Hälfte der Masse der Sonde entfällt auf das Antriebssystem. Es verwendet Hydrazin und Stickstofftetroxid. Das Hydrazin wird auch zur Lageregelung verwendet. NEAR hat die Form eines sechseckigen Prismas von 1,8 m Höhe und Durchmesser. Die Sendeleistung ist mit 5 Watt nur gering. NEAR verwendet zwei Solid-State-Rekorder aus 16 Mbit DRAM-Bausteinen, um Daten abzulegen.

Die Instrumente sind auf die Fernerkundung spezialisiert. Die Kamera besitzt einen relativ kleinen CCD-Sensor. Sie basierte auf einem Experiment, das für das SDI-Programm entwickelt wurde. Dazu kommt ein Infrarotspektrometer, das ein Spektrum aus 64 Messpunkten anfertigt, ein Laser-Abstandsmesser zur Ermittlung der Form von Eros, ein Röntgen- und Gammastrahlenspektrometer zur Feststellung der mineralogischen Zusammensetzung durch Bestimmung der abgegebenen Gammastrahlung und Röntgenfluoreszenzstrahlung. Ein Magnetometer war an der HGA als entferntestem Punkt der Sonde montiert. Es war damit nicht empfindlich genug für schwache Magnetfelder, doch sollte Eros ein starkes Magnetfeld besitzen, so würde es das Magnetometer detektieren.

Es wurden eine Reihe von Zielen untersucht. Ursprünglich gab es den Plan, zwei Asteroiden über eine Dekade zu besuchen. Doch eine so lang dauernde Mission war mit dem Budget nicht finanzierbar. Primäres Ziel war ursprünglich der Asteroid 4660 Nereus. Ein Vorbeiflug am Kometen Encke war auch im Gespräch. Schließlich wechselte die Missionsplanung auf den Asteroiden 433 Eros. Er war deutlich größer als die anderen Ziele. Damit gab es die

Möglichkeit, in einen Orbit einzuschwenken. Bei den kleineren Asteroiden erfordert das wegen der geringen Schwerkraft eine sehr aufwendige Verfolgung und Nachjustage der Bahn. Nereus und Encke sollten nur begleitet werden, ohne in einen Orbit einzuschwenken.

Eros gehört zur Klasse der Amor-Asteroiden, dies sind Marsbahnkreuzer. Eros befindet sich immer außerhalb der Erdbahn. Er ist leicht erreichbar. NEAR musste trotzdem ein Swing-By Manöver durchführen. Der Grund war, dass Eros Bahn um 10,8 Grad zur Erdbahn geneigt ist. Die nötige Inklinationsanpassung konnte die Delta-Trägerrakete nicht leisten. Die Delta schickte NEAR auf eine Bahn mit einer Entfernung von 2,17 AE, deutlich außerhalb des Orbits von Eros, der sich maximal 1,78 AE von der Sonne entfernt. Die Bahn hatte eine Umlaufzeit von 2 Jahren. Sie führte zwei Jahre nach dem Start zurück zur Erde. Ein erstes Manöver legte den Passagezeitpunkt etwas früher und sorgte für die richtige räumliche Position, um Eros zu erreichen. Der Vorbeiflug an der Erde hob die Inklination an und senkte den sonnenfernsten Punkt ab. Mit den eigenen Treibstoffvorräten musste NEAR dann den sonnennächsten Punkt auf 1,14 AE anheben. Auf der Abfangbahn näherte sich NEAR Eros, bremste nach und nach ab, um schließlich in eine Umlaufbahn um Eros einzuschwenken.

Schon vor dem Start konnte die NASA eine Erfolgsmeldung verkünden: NEAR wurde in nur 29 Monaten anstatt 36 gebaut und kostete nur 124,9 anstatt 150 Millionen Dollar. Nach dem erfolgreichen Start passierte NEAR am 27.8.1997 den Asteroiden 253 Mathilde. Es gab Diskussionen, ob man an diesem Asteroiden vorbeifliegen sollte, da dies zusätzlichen Treibstoff kostete und Mathilde nahe des sonnenfernsten Punkts der Bahn passiert wurde. In dieser Distanz reichte der Strom nur für den Betrieb eines Experiments aus. Man entschied sich für die Kamera und

machte Aufnahmen beim Vorbeiflug in 1.200 km Entfernung. Mathilde war mit $66 \times 48 \times 46$ km Größe der bisher größte von einer Raumsonde passierte Asteroid. Wenige Tage später senkte NEAR durch eine Zündung der Triebwerke am 3.7.1997 das Perihel von 0,99 auf 0,95 AE ab. Damit würde NEAR am 22.1.1998 in minimal 540 km Abstand an der Erde vorbeifliegen. Als NEAR die Erde passierte, nutzte man die Experimente für Erdbeobachtungen, um sie zu kalibrieren. Das Infrarotspektrometer wies in der Antarktis Wasser und Eis nach. Die Kamera konnte in der saudi-arabischen Wüste kreisrunde Flächen aufnehmen - in großem Maßstab bewässerte Regionen, die dunkler als der Sand sind. Damit gelang NEAR zum ersten Mal der Beweis, dass es auf der Erde hoch entwickeltes Leben gibt. Wenige Jahre vorher war ein ähnlicher Versuch mit der Raumsonde Galileo (Band 1, S. 188) noch gescheitert.

Die Erde erhöhte die Bahnneigung von 0,5 auf 10,2 Grad und das Aphel wurde auf 1,77 AE abgesenkt. Durch ihr Perihel in 0,95 AE Entfernung war NEAR nun auf einer Abfangbahn zu Eros, dessen Perihel in 1,14 AE Distanz liegt. Am 5.11.1998 nahm die Kamera zum ersten Mal Eros auf. Am 20.12.1998 sollte NEAR die Geschwindigkeit um 965 m/s steigern und damit das Perihel auf 1,15 AE anheben. Damit reduzierte sich die Relativgeschwindigkeit zu Eros drastisch und am 10.1.1999 sollte die Raumsonde in einen Orbit einschwenken. Doch die Zündungssequenz wurde abgebrochen. Die Sonde geriet in einen Safe-Mode, doch auch der war nicht stabil. NEAR versuchte über 24 Stunden vergeblich, sich korrekt auf die Sonne auszurichten. Sie verbrauchte dabei 29 kg Treibstoff. Erst nach einem Tag konnte die Lage stabilisiert werden. Durch die nahezu entladene Batterie und den Zeitverlust war an ein Einschwenken in einen Orbit um Eros nun nicht mehr möglich. Am 23.12.1998 passierte NEAR Eros in 3.827 km Entfernung. Man aktivierte Kamera und das IR-Spektrometer

und erfasste in 1.026 Aufnahmen 60 % der Oberfläche. Der Auslöser des Ausfalls wurde nie dingfest gemacht. Ein Computer- oder Softwarefehler gilt als wahrscheinlichste Ursache.

Es wurde ein Alternativplan erarbeitet und NEAR durch eine Triebwerkszündung auf eine Bahn gebracht, die sie nach 13 Monaten erneut zu Eros führte. Am 14.2.2000 schwenkte der Späher als erste Raumsonde in einen Orbit um einen Asteroiden ein. Der anfängliche Orbit von 327×366 km Höhe wurde, nachdem mit den Instrumenten die Gestalt von Eros genauer erfasst war, sukzessive abgesenkt. Am 30.4.2000 erreichte NEAR einen kreisförmigen Orbit in 50 km Höhe. Dies war der Kartierungsorbit. Er wurde am 14.7.2000 auf 35 km Distanz für bessere Gravitationsfeldmessungen abgesenkt und danach mehrfach angehoben und abgesenkt. Der minimale Abstand zum Zentrum wurde am 25.10.2000 mit 21 km, das sind 5,4 km über der Oberfläche, erreicht. In den tiefen Orbits war NEAR nur einige Tage, da die Navigation durch die unregelmäßige Form von Eros aufwendig und riskant war.

Von den Instrumenten fiel das IR-Spektrometer schon am 30.5.2000 aus, es erfasste nur 70 Prozent der Oberfläche. Dagegen lieferte die Kamera über 160.000 Aufnahmen. Eine Änderung gegenüber bisherigen Programmen war, dass die Finanzierung keine Verlängerung vorsah. Bisher betrieb man Missionen solange, wie dies technisch möglich war. Bei NEAR lief nach Ende der Primärmission, einem Jahr im Orbit, die Finanzierung aus. Durch die Verlängerung der Mission um 13 Monate waren die Missionskosten bereits von 46,2 auf 60,8 Millionen Dollar angestiegen. So brachte die Missionskontrolle NEAR gezielt zum Absturz. Am 12.2.2001 zündet man die Lagekorrekturdüsen ein letztes Mal und NEAR stürzte zur Oberfläche. Die Gelegenheit nutzte man, um beim Abstieg noch 69 weitere Bilder aufzunehmen, die

aus einer Distanz gewonnen wurden, die NEAR bisher nicht erreicht hatte. Das letzte, allerdings unvollständige, Bild stammt aus 120 m Höhe.

Bedingt durch die schwache Gravitation des nur $13 \times 13 \times 33$ km großen Eros landete NEAR mit nur 1,6 bis 1,9 m/s. So wurde sie nicht beschädigt, ihre Hauptantenne schaute aber nicht mehr zur Erde. NEAR konnte jedoch noch mit der Rundstrahlantenne mit niedriger Bitrate senden. Die NASA bewilligte die Mittel für eine Verlängerung der Mission um 14 Tage. Dies wurde genutzt, um drei Spektren mit dem XRGs aufzunehmen, das beim direkten Kontakt mit der Oberfläche viel genauere Messungen durchführen konnte als vom Orbit aus. Am 14.2.2001 benannte man die Sonde in NEAR-Shoemaker um. Eugene Shoemaker war in den Sechzigern und Siebziger Jahren stark an den Raumsonden der NASA beteiligt. Er war Leiter des Teams, das die Kameradaten der Voyagers auswertete und wissenschaftlicher Leiter des Apollo-Programms. Er starb am 18.7.1997. Die NASA hatte schon andere Raumsonden nach der Landung umbenannt, so Pathfinder und die beiden Viking Lander.

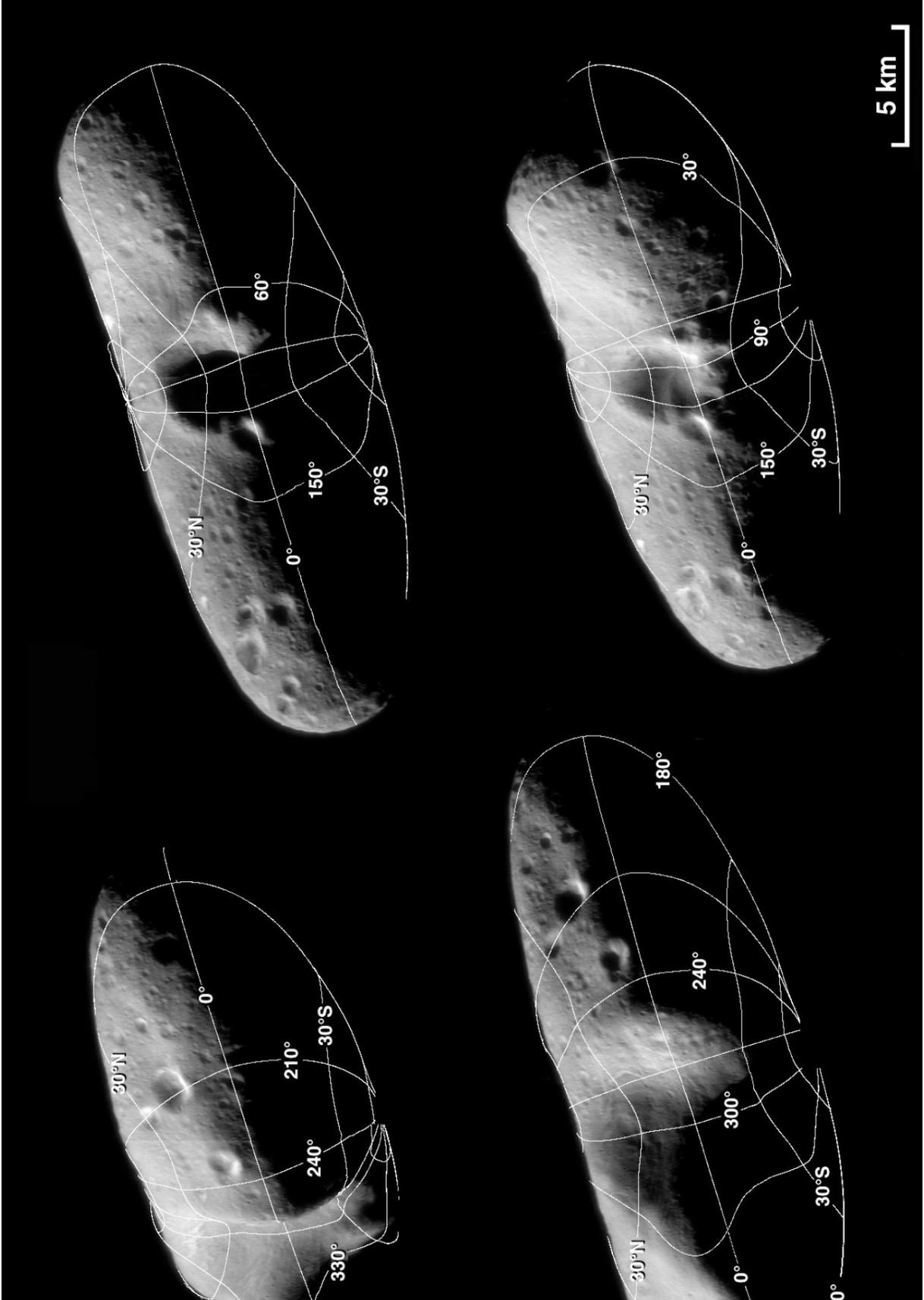
Am 28.2.2001 war die Anschlussfinanzierung ausgelaufen und NEAR-Shoemaker wurde in einen Standby-Modus versetzt, in dem er auf weitere Instruktionen wartet. Bedingt durch die Umlaufbahn von Eros näherte sich NEAR-Shoemaker am 10.12.2002 wieder bis auf 86 Millionen km der Erde. Man nutzte die größten Antennen des DSN um die Sonde zu aktivieren, doch sie antwortete nicht mehr. Es wäre auch Zufall gewesen, da man nach der Landung die Solarzellen nicht mehr der Sonne nachführen konnte, dadurch entlud sich die Batterie.

Datenblatt NEAR	
Start:	17.2.1996 mit Delta 7925 (D232) in eine 0,99 × 2,17 AE Sonnenumlaufbahn
Ankunft:	27.6.1997 Vorbeiflug an Asteroid Mathilde in 1.200 km Entfernung 23.1.1998 Vorbeiflug an der Erde in 540 km Entfernung 23.12.1998 Vorbeiflug an Eros in 3.827 km Entfernung 14.2.2000 Einschwenken in einen Orbit um Eros. 12.2.2001 Landung auf Eros
Missionsende:	28.2.2001
Mission:	Asteroidenorbiter
Gewicht:	805 kg beim Start, 468 kg ohne Treibstoffe
Abmessungen:	1,8 m Durchmesser
Instrumente:	<p>Fünf Experimente im Gesamtgewicht von 56 kg:</p> <ul style="list-style-type: none"> • MSI: Multispektralkamera. Kamera mit einem 50-mm-Objektiv und 168 mm Brennweite. Gesichtsfeld 2,26 × 2,90 Grad. CCD-Detektor mit 244 × 537 Pixel. Gewicht 7,7 kg. • NIS: Nahinfrarotspektrometer: Empfindlich zwischen 0,806 und 2,732 µm. 96 Messpunkte pro Spektrum. Gesichtsfeld 0,37 × 0,74 Grad. Räumliche Auflösung 1,3 km. Gewicht: 17,5 kg. • NLR: Laser-Abstandsmesser. Laser mit 1,064 µm Wellenlänge mit einer Bodenauflösung von 12 m in 50 km Entfernung. Gewicht 5,0 kg. • XGRS: Gamma-/Röntgenspektrometer misst Gammastrahlen zwischen 0,1 und 10 MeV und solare / von Eros abgegebenen Röntgenstrahlen zwischen 0,5 und 10 keV Energie. Detektiert radiogene Elemente und stellt die chemische Zusammensetzung der Oberfläche mit einer Auflösung von 2 km fest. Gesichtsfeld Röntgenspektrometer: 5 Grad. Gewicht 24,0 kg. • MAG: Magnetometer. 13 Verschiedene Messbereiche von 4 bis 65.536 nT, Auflösung je nach Meßbereich: 0,000125 bis 2 nT. Maximal 20 Vektoren/s. Gewicht 2,0 kg. • RS: Radioscience: Bestimmt die Geschwindigkeit der Sonde auf 0,1 mm/s genau.
Ergebnisse:	<p>NEAR erfasste die Oberfläche von Eros mit mindestens 5 m Auflösung, stellenweise bis 3 m. Aus 5,4 Millionen Messungen des Laserabstandmessers entstand ein topografisches Modell mit 500 m Auflösung. Auffällig war, dass Eros nur wenige Krater hat und von einer 100 m dicken Schuttschicht bedeckt wird. Mathilde hat eine Dichte von 1,3 g/cm³, er enthält Hohlräume</p>

	und gehört zum C-Typ der Asteroiden. NIS fällt nach Erfassung von 70 % der Oberfläche aus.
Bilder:	160.000
Kosten:	124,9 Millionen Dollar Raumsonde, 43,5 Millionen Dollar Trägerrakete, 60,8 Millionen Dollar Überwachung. Gesamt 224 Millionen Dollar (Wert 1992)



3. Abbildung: Künstlerische Darstellung von NEAR bei Eros





4. Abbildung: Vier Ansichten von Asteroid Eros