



15 Jahre Weltraumteleskop HUBBLE

Chronik der Mission

VON TILMANN ALTHAUS

Am 24. April 1990 startete die amerikanische Raumfähre *DISCOVERY* mit einer ganz besonderen Nutzlast ins All: dem Weltraumteleskop *HUBBLE*. Seither umkreist das Weltraumteleskop die Erde – hier die Geschichte und Technik des epochalen Forschungsatelliten.



▶ Der Start der Raumfähre *DISCOVERY* am 24. April 1990, an Bord das Weltraumteleskop *HUBBLE*. (Bild: NASA-JSC)

◀ Das HST nach der erfolgreichen zweiten Servicemission am 18. Februar 1997 kurz vor dem Wiederaussetzen ins All. Gut erkennbar die beiden Solarpaneele zur Stromversorgung und das weiße Rechteck der Weitfeld/Planetenkamera-2. (Bild: NASA-JSC)



Die Vorgeschichte

Wohl der erste, der sich ernsthaft Gedanken über ein Weltraumteleskop machte, war der berühmte Raketenforscher und Raumfahrtpionier Hermann Oberth (1894–1989, Abb. 1). In seinem bereits 1923 erschienenen Buch »Die Rakete zu den Planetenräumen« schreibt er: *Im Ätherraum können Fernrohre von jeder Größe benutzt werden, da die Sterne nicht flimmern. Zustatten kommt uns dabei die schwarze Farbe des Himmels sowie das Fehlen des Andrucks und der Luft.* Im weiteren erwähnt er auch: *Gewisse Untersuchungen über strahlende Energie sind auf der Erde nicht möglich, da die Atmosphäre kurzwellige Lichtstrahlen verschluckt.* Damit hatte schon Hermann Oberth erkannt, welche Vorteile ein Teleskop im Weltraum aufweist.

Der geistige Vater des heutigen Weltraumteleskops HUBBLE war der Astrophysiker Lyman Spitzer (1914–1997), der 1946 zu ähnlichen Schlüssen wie Oberth gekommen war. Er hatte am V2-Testprogramm mit erbeuteten deutschen V2-Raketen in White Sands, New Mexico, mitgearbeitet. Dabei wurden die Raketen mit Kameras und Messgeräten bestückt abgeschossen und erreichten Höhen von bis zu 200 Kilometern. So erhielt Spitzer einen Eindruck davon, was ein Teleskop in der Erdumlaufbahn leisten könnte.

1962 regte das *Space Science Board* der *National Academy of Sciences* ein Weltraumteleskop als »*Long time goal*« an. 1966 wurde ein Komitee »*Scientific Uses of Large Space Telescope*« gegründet, welches bis 1969 seine Schlussfolgerungen lieferte. Lyman Spitzer war Sprecher dieses Komitees. So begann 1969 die 1958 neu gegründete US-Weltraumbehörde NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) mit den Vorbereitungen für ein »*Large Space Telescope* (LST)« als Langzeitprojekt.

Dieses LST sollte einen Hauptspiegeldurchmesser von drei Metern erhalten. Lange Zeit blieb es nur bei Papierkonzepten, in denen mannigfaltige Konfigurationen durchgespielt wurden. 1974 wurde festgelegt, dass ein künftiges Weltraumteleskop mit austauschbaren wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet werden sollte, die von Astronauten im All gewechselt werden konnten. Zu diesem Zeitpunkt begannen auch die amerikanischen Raumfähren vom Typ SPACE SHUTTLE Gestalt anzunehmen.

Konkret wurde es schließlich im Jahre 1977, als das US-Repräsentantenhaus den Bau eines Weltraumteleskops genehmigte. Allerdings war aus Gewichts- und Kostengründen der Durchmesser des Hauptspiegels von drei Metern auf 2.4 Meter reduziert worden, die räumli-

Das Weltraumteleskop HUBBLE – Die Technik

Das Weltraumteleskop HUBBLE ist zylindrisch geformt und ist 13 Meter lang. Es misst an der breitesten Stelle 4.2 Meter. Etwa in der Mitte des Zylinders verjüngt sich der Durchmesser auf drei Meter. Das Gewicht des Forschungssatelliten beträgt 11.6 Tonnen.

Das HST gliedert sich in zwei wichtige Baugruppen, das »*Support Systems Module* (SSM)«, welches die zum Betrieb des Satelliten notwendige technische Ausrüstung umfasst, und den »*Optical Telescope Assembly* (OTA)«, das eigentliche Spiegelteleskop mit den wissenschaftlichen Instrumenten (Abb. 1).

Von vornherein wurde das HST auf Wartung durch Astronauten im Weltraum in klobigen Raumanzügen ausgelegt. Praktisch alle wichtigen Baugruppen, von der Trägerstruktur und den Spiegeln des Teleskops selbst abgesehen, befinden sich in leicht ausbaubaren Modulen, den so genannten »*Orbital Replacement Units*«. Außerdem sind an den Außenflächen des Satelliten Griffe und Halteösen für die Astronauten angebracht.

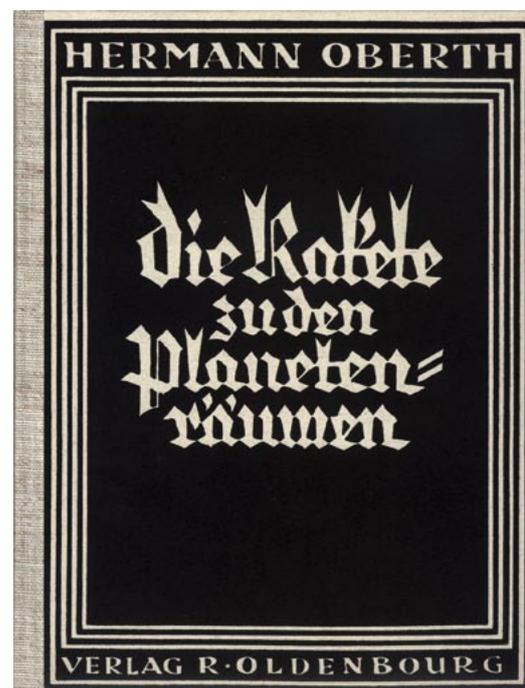
Das Support Systems Module SSM

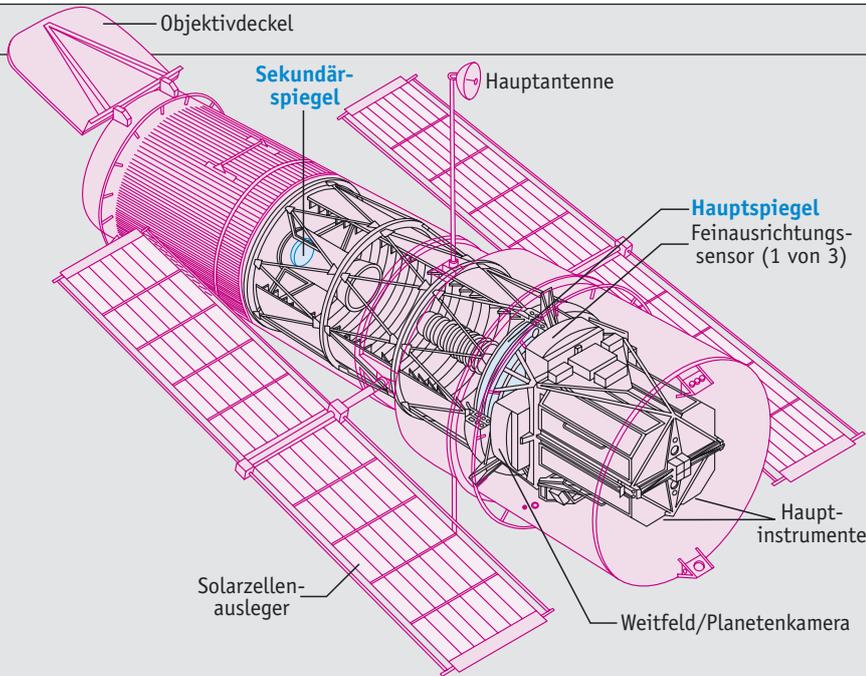
Das SSM beinhaltet sowohl die elektronische Ausrüstung als auch die mechanischen Trägerstrukturen des Satelliten. Zur elektronischen Ausrüstung gehören die beiden Solarzellenflächen, die Bordcomputer zur Steuerung, die Kreisel zur Lageregelung und Ausrichtung des Satelliten, die beiden parabolischen Hauptantennen und vieles mehr. Auch der aufklappbare Objektivdeckel zum Schutz der empfind-

lichen Optik bei Start und Wartungsarbeiten ist Teil des SSM. Fast die gesamte technische Ausrüstung befindet sich in einem Gerätering am oberen Ende des dickeren Zylinders.

Im Gegensatz zu vielen anderen Forschungssatelliten verfügt das HST über keinerlei Raketenantriebe zur Bahnveränderung und Lagekontrolle. Dies dient zur Reinhaltung der Umgebung des Teleskops, da sich die Abgase chemischer Raketenmotoren auch auf den Spiegeloberflächen niederschlagen und sie so über die Jahre eintrüben könnten. Da das Teleskop auf seiner Bahn in etwa 600 Kilometern Höhe aber immer noch der Reibung der Restatmosphäre ausgesetzt ist, sinkt seine Bahnhöhe über die Jahre hinweg langsam ab. Daher wurde die Bahn bei den bisherigen Wartungsmissionen nach Abschluss aller Arbeiten mit Hilfe der Triebwerke der Raumfähren um einige Kilometer angehoben, um die Reibungsverluste wettzumachen.

Die Ausrichtung und Lageregelung des HST geschieht mit Hilfe von vier Drallrädern, großen Kreiseln, die das Teleskop durch Drehimpulsübertragung in die gewünschte Richtung schwenken. Diese Drallräder rotieren mit bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute. Um zu verhindern, dass sich die Drallräder zu schnell drehen, sind so genannte »*Magnetic Torquer Bars*« an Bord. Dies sind längliche Spulen, die ein Magnetfeld erzeugen, welches dann mit dem Erdmagnetfeld in Wechselwirkung tritt, um Drehimpuls abzugeben. In anderen Satelliten wird die-





▲ Abb. 1: Das Weltraumteleskop HUBBLE in einer Übersichtgraphik. In rosa ist das Support Service Module (SSM) dargestellt, in schwarz der Optical Telescope Assembly (OTA). (Aus: John N. Bahcall und Lyman Spitzer: *The Space Telescope*, Scientific American, **247**, 7/1982, S. 40–51/SuW)

Ausfällen und bereiteten schon viele Probleme. Für die Grobausrichtung verfügt das Weltraumteleskop zusätzlich über drei Sternensensoren und zwei Sonnensensoren. Die Sonnensensoren üben eine Wächterfunktion für das Teleskop aus: Schwenkt das HST näher als 20 Grad an die Sonne heran, wird der Objektivdeckel automatisch geschlossen, um die Optik und die Instrumente zu schützen.

Die Übertragung mit Hilfe von Steuertriebwerken durchgeführt.

Die Drallräder werden mit Hilfe von insgesamt sechs Steuerkreislern kontrolliert, von denen im Normalbetrieb drei benötigt werden. Diese Gyroskope sind einer der Schwachpunkte des HST, sie neigen zu

Der Stromversorgung erfolgt mit Hilfe von zwei Solarzellenauslegern. Bis zur letzten Servicemission im März 2002 handelte es sich dabei um ausrollbare Flächen von 12.1 Metern Länge und 2.5 Metern Breite. Sie wurden von der Europäischen Weltraumbehörde ESA im Rahmen der Kooperation geliefert. Seit März 2002

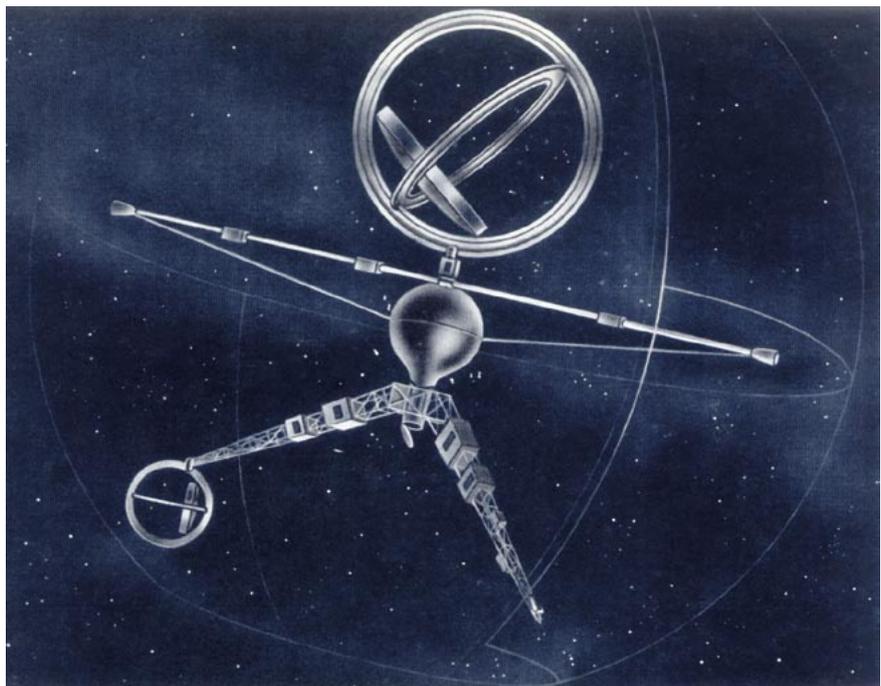
übernehmen kleinere, aus festen Platten bestehende Solarzellenausleger die Stromversorgung, sie verfügen über Solarzellen mit höherem Wirkungsgrad. Um auch im Erdschatten arbeiten zu können, ist das HST mit sechs Nickel-Hydrid-Batterien ausgerüstet, welche als Energiepuffer dienen.

Der Optical Telescope Assembly OTA

Wie der englische Name schon andeutet, handelt es sich beim OTA um das Teleskop selbst und die dazugehörigen wissenschaftlichen Instrumente. Die Optik ist ein Spiegelteleskop vom Typ Ritchey-Chrétien. Im Aufbau ist es mit einem Cassegrain-Teleskop vergleichbar, es verfügt über einen Hauptspiegel mit zentralem Loch und einen davor befindlichen Sekundärspiegel. Der Unterschied ist die Form des Spiegelschliffs, beide Spiegel sind Rotationshyperboloide. Ritchey-Chrétien-Optiken bieten ein größeres verzerrungsfreies Sichtfeld gegenüber Teleskopen mit Parabolspiegeln. Das Teleskop verfügt über eine Brennweite von 57.6 Metern, durch die Faltung des Strahlengangs lässt sich diese Brennweite in einer Länge von 6.4 Metern unterbringen.

Der Hauptspiegel weist einen Durchmesser von 2.4 Metern auf und besteht aus einem Spezialglas der Firma Corning Glass Works mit der Bezeichnung ULE, *Ultra Low Expansion Glass*. Dieses Glas zeichnet sich durch sehr geringe thermische Expansion aus. Da ein massiver Hauptspiegel zu schwer gewesen wäre, besteht der

◀ Abb. 1: Links: Hermann Oberth Anfang der frühen achtziger Jahre. Rechts: Oberths berühmtestes Werk: »Die Rakete zu den Planetenräumen« aus dem Jahre 1923.



▶ Abb. 2: Raumstation mit Weltraumteleskopen nach den Plänen von Hermann Oberth. Aus »Hermann Oberth: Menschen im Weltraum«, Econ-Verlag Düsseldorf 1957.

Das Weltraumteleskop HUBBLE – Die Technik (Fortsetzung)

Hauptspiegel im Kern aus einer Glaswabenstruktur mit Bodenplatte und Deckel. Somit wiegt er nur 818 Kilogramm, ein massiver Spiegel hätte das 4.3fache gewogen. Der Deckel ist der Träger des optischen Schiffs und wurde mit Aluminium bedampft. Der Sekundärspiegel ist konvex geformt und weist einen Durchmesser von 30 Zentimetern auf. Er besteht aus Zerodur. Gehalten wird er von einer Zentrierspinne mit vier Beinen. Die Teleskopstruktur selbst besteht aus einer zylindrischen Gitterkonstruktion aus Kohlefaserverbundwerkstoffen von 4.8 Metern Länge und einem Durchmesser von 2.7 Metern.

Unterhalb des Hauptspiegels schließt sich der »Focal Plane Assembly« an. Hier befinden sich, in 90°-Winkeln verteilt, die drei Feinausrichtungssensoren und die Weitfeld/Planetenkamera. Dahinter schließen sich vier Plätze für die Hauptinstrumente an. Der Focal Plane Assembly wird vom 4.2 Meter dicken, unteren Zylinder des Support Systems Module lichtdicht umschlossen.

Die Feinausrichtungssensoren (*Fine Guidance Sensors*, FGS) sorgen für die exakte Ausrichtung von HUBBLE auf das Zielobjekt. Sie dienen zum Aufsuchen von Leitsternen und halten diese mit einer Genauigkeit von 0.007 Bogensekunden fest. Beginnt der Stern sich im Zielfeld geringfügig zu bewegen, senden die FGS Steuersignale an die Lagekontrolle des Teleskops. Jeder FGS verfügt über ein Blickfeld von 60 Quadratbogensekunden, welche sich am äußersten Rand des Sicht-

felds des Teleskops befinden. Hier sind die Bildfeldwölbung und der Astigmatismus am größten, so dass sich diese Gebiete nur schlecht für wissenschaftliche Instrumente eignen, für die FGS ist die Bildqualität aber gut genug. Für die Ausrichtung werden nur zwei FGS benötigt, daher kann das dritte Gerät für die Vermessung von Sternpositionen (Astrometrie) verwendet werden. Diese Messungen laufen parallel zu der eigentlichen Beobachtung.

Die wissenschaftlichen Instrumente (Erstausrüstung)

Beim Start verfügte das Weltraumteleskop HUBBLE über fünf wissenschaftliche Hauptinstrumente: die Weitfeld/Planetenkamera (WF/PC), die Faint Object Camera (FOC), den Goddard High Resolution Spectrograph (GHRS), den Faint Object Spectrograph (FOS) und das High Speed Photometer (HSP). Alle Instrumente deckten nur einen kleinen Bruchteil des Gesamtsichtfelds des Teleskop ab.

Die Weitfeld/Planetenkamera erhielt dabei den besten Platz, sie empfängt ihr Licht über einen um 45 Grad geneigten Umlenkspiegel genau aus der Mitte des Strahlengangs, wo die Bildqualität des Teleskops am besten ist. Die WF/PC befindet sich im oberen Teil des Focal Plane Assembly bei den drei Feinausrichtungssensoren. Sie ist von außen für Astronauten im Raumzugang frei zugänglich. In der Erstausrüstung verfügte die WF/PC über acht Bildkanäle, die einen Spektralbereich von 115 (Ultraviolett) bis 1100

Nanometern (nm, nahes Infrarot) abdecken. Als Detektoren dienten CCD-Chips. Die originale WF/PC wurde bereits im Dezember 1993 durch das verbesserte Nachfolgemodell WF/PC-2 ersetzt.

Die Faint Object Camera, der wissenschaftliche Hauptbeitrag der ESA zum HST, war bis zum März 2002 in Betrieb (Abb. 2). Die Kamera ist kastenförmig, etwa 2.2 Meter lang und 0.9 Meter breit. Sie wog 318 Kilogramm und war unter der Federführung der Firma Dornier System GmbH in Friedrichshafen am Bodensee, heute Teil des Raumfahrtkonzerns EADS/Astrium, gebaut worden. Sie war beim Start das lichtempfindlichste Instrument an Bord des HST und sollte eine visuelle Grenzgröße von 28 mag erreichen. Durch den Schlifffehler des HST wurde dieser Wert aber nicht erreicht.

Die FOC verfügte über zwei unabhängige Kamerasysteme mit $f/96$ und $f/48$. Das $f/96$ -System verfügte über insgesamt 48 Filter auf vier Filterrädern und deckte einen Spektralbereich von 115 (UV) bis 650 Nanometern (rotes Licht) ab. Das $f/96$ -System verfügte über ein Blickfeld von nur 22 Quadratbogensekunden, nutzte aber die Auflösung des HST bis zur Beugungsgrenze aus. Das $f/48$ -Kamerasystem erreichte nicht die extrem hohe Auflösung des $f/96$ -Systems, verfügte aber über ein doppelt so großes Blickfeld. Insgesamt standen 24 Filter auf zwei Filterrädern zur Verfügung, der Spektralbereich war identisch mit demjenigen des $f/96$ -Systems.

Beide Kamerasysteme verwendeten jeweils den gleichen Detektortyp, eine Ka-

che Auflösung sollte damit aber immer noch besser als eine zehntel Bogensekunde sein. Das Teleskop würde sowohl mit Kameras als auch mit Spektrographen bestückt werden und einen möglichst weiten Spektralbereich abdecken. Um die Kosten im Rahmen zu halten, hielt die NASA schon früh nach einem Kooperationspartner Ausschau, den sie schließlich in der Europäischen Weltraumbehörde ESA fand. Die ESA übernahm 15 Prozent der Gesamtkosten und lieferte ein Hauptinstrument, die *Faint Object Camera* (FOC), und die beiden Solarzellenausleger zur Stromversorgung. Dafür wurde den Europäern ein Mindestanteil von 15 Prozent an der Gesamtbeobachtungszeit des Weltraumteleskops garantiert.

Benannt wurde das Weltraumteleskop nach Edwin P. Hubble (1889–1953), der im Jahre 1924 nachweisen konnte, dass unser Weltall nicht nur aus dem Milch-

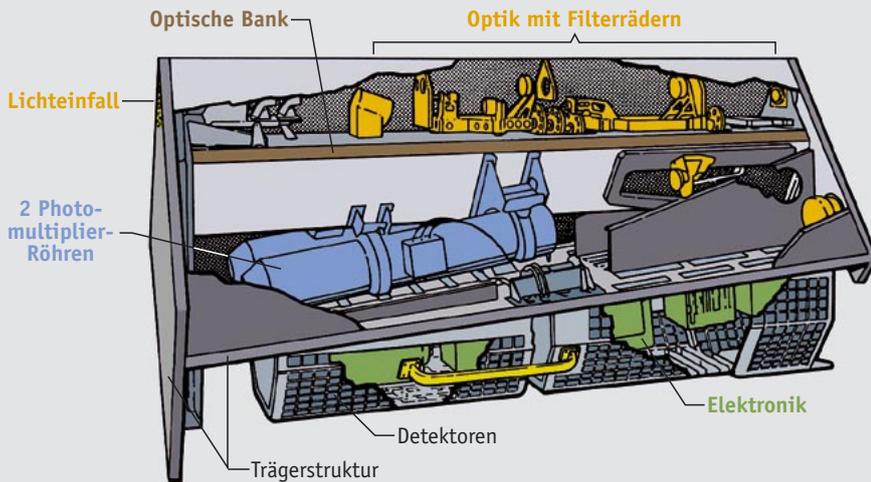
straßensystem besteht, sondern dass es Milliarden anderer Galaxien gibt. Außerdem konnte Hubble feststellen, dass sich das Weltall weiter ausdehnt, da das Licht von den anderen Galaxien durch die Expansion des Raums ins Rote verschoben ist. Lyman Spitzer wurde dann im Jahre 2002 mit der Benennung der »*Space Infrared Telescope Facility* (SIRTF)« in »*SPITZER Space Telescope*« geehrt.

Das HST nimmt Form an

Der Bau des *HUBBLE Space Telescope* (HST) fand unter der Leitung des *Marshall Space Flight Center* (MSFC) der NASA in Huntsville, Alabama, statt. Gebaut wurde das Teleskop von der Lockheed Missiles and Space Company, heute Teil des US-Raumfahrtkonzerns Lockheed-Martin. Lockheed war für die Gesamtintegration und die technischen Systeme des Satelliten verantwortlich, die Optik und die Feinausrichtungssensoren (siehe Kasten ab

Seite 24) wurden von der Firma Perkin-Elmer (heute Hughes Danbury Optical Systems) entwickelt und gebaut. Die wissenschaftliche Leitung der Instrumentenentwicklung lag beim *Goddard Space Flight Center* (GSFC) der NASA in Greenbelt, Maryland, wo sich auch heute noch der Kontrollraum für das Weltraumteleskop befindet.

Als Erstausrüstung wurden für das HST ausgewählt: Die Faint Object Camera der ESA, die Weitfeld/Planetenkamera WF/PC, der *Faint Object Spectrograph* (FOS), der *Goddard High Resolution Spectrograph* (GHRS) und das *High-Speed Photometer* (HSP). Um das Weltraumteleskop wissenschaftlich voll auszunutzen, wurde 1983 an der Johns-Hopkins University in Baltimore, Maryland, das *Space Telescope Science Institute* (STScI) gegründet, welches bis heute die Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop leitet.

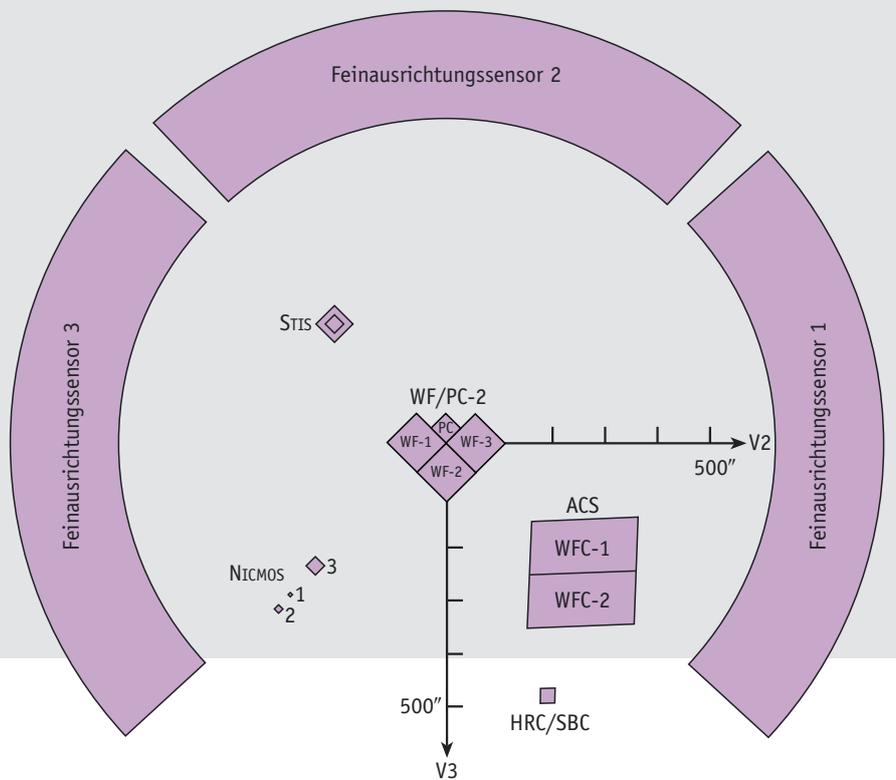


◀ Abb. 2: Übersichtgraphik der Faint Object Camera (FOC) mit den wichtigsten Baugruppen. (Bild: NASA/SuW)

▼ Abb. 3: Die Blickfelder der HST-Instrumente in der Fokalebene des Weltraumteleskops. Über das größte Sichtfeld verfügen die Feinausrichtungssensoren (FGS), die wissenschaftlichen Instrumente nutzen nur einen kleinen Teil des eigentlichen Sichtfelds des Teleskops aus. (Bild: NASA/STScI)

thodenstrahlröhre mit Bildverstärker. Sie verfügten jeweils über 512 Zeilen mit 512 Bildpunkten. Zur Zeit des Baus des HST war die Bildröhrentechnik im Bereich der Lichtempfindlichkeit den CCD-Detektoren noch deutlich überlegen und technisch gesehen hatte Europa hier die Nase vorn.

Die beiden Spektrographen, der Faint Object Spectrograph FOS und der Goddard High Resolution Spectrograph GHRS ergänzten einander. Der FOS wies eine hohe Empfindlichkeit von bis zu 26 mag auf, verfügte aber nur über eine mittelmäßige spektrale Auflösung von etwa 250. Der GHRS konnte dagegen nur hellere Objekte ab 13 mag und heller registrieren, erreichte dabei allerdings eine Auflösung von bis zu 100000. Der GHRS deckte einen Spektralbereich von 105 bis 320 Nanometern (UV) ab und war bis zum Februar 1997 im Einsatz. Der FOS deckte einen größeren



Der Bau und die Entwicklung des Weltraumteleskops liefen allerdings nicht problemlos und es kam zu mehrjährigen Verzögerungen wegen überschießender Kosten und unterschätzter Schwierigkeiten bei der technischen Realisierung des Satelliten. Schließlich war das Teleskop im Jahre 1985 fertig zusammengebaut und sah seinem Start im Frühjahr 1986 entgegen.

Allerdings schlug am 28. Januar 1986 das Schicksal zu, als die Raumfähre CHALLENGER 73 Sekunden nach dem Abheben im sonnigen Himmel über Florida in einem Feuerball explodierte und alle sieben Astronauten ums Leben kamen. Durch diese Katastrophe war das Raumfährenprogramm für mehr als 2¹/₂ Jahre ausgesetzt und alle Nutzlasten für die Raumfähren mussten warten, darunter auch das HST. Nach vier Jahren der Einlagerung des Teleskops in einem Reinraum bei der Firma Lockheed

war es dann im April 1990 so weit, die Raumfähre DISCOVERY trug die wertvolle Fracht ins All.

STS-31: Das HST wird ausgesetzt

Ein Blick in die Nutzlastbuchse der DISCOVERY zeigt, dass der Frachtraum mit dem Weltraumteleskop bis fast zur Gänze gefüllt war. Das Teleskop wurde daher am 25. April sanft ins All gerollt (Abb. 3), die Besatzung der Raumfähre blieb in der Nähe, um im Falle von Problemen eingreifen zu können. Doch die Aktivierung des Satelliten, das Ausfahren der Solarzellen und der Hauptsendeantennen verlief ohne größere Probleme. Für das HST begann nun die Test- und Kalibrierphase der technischen Ausrüstung und der wissenschaftlichen Instrumente.

Am 20. Mai 1990 lieferte das Weltraumteleskop HUBBLE die ersten Bilder, aber es drang noch nichts an die Öffentlichkeit, die schon sehr gespannt und ungeduldig auf die ersten Resultate des vielgepriesenen Weltraumteleskops wartete.

Der Schock

Am 25. Juni 1990 wurde schließlich das erste Bild des Weltraumteleskops veröffentlicht. Es war mit der Weitfeld/Planetenkamera aufgenommen worden und zeigte einen Ausschnitt des Offenen Sternhaufens NGC 3532 im Sternbild Carina (Abb. 4). Es wirkte auf den ersten Blick sehr gut.

Aber schon kurz danach musste die NASA zugeben, dass das Weltraumteleskop einen schweren optischen Fehler

Das Weltraumteleskop HUBBLE – Die Technik

Spektralbereich von 110 (UV) bis 800 Nanometern (rotes Licht) ab. Auch er war bis zum Februar 1997 in Betrieb.

Das High Speed Photometer HSP diente, wie der englische Name andeutet, der Beobachtung schneller Lichtveränderungen von Beobachtungsobjekten. Es handelte sich um ein recht einfaches Instrument, welches im Spektralbereich von 120 (UV) bis 750 Nanometern (rotes Licht) empfindlich war. Aufgrund des Schlifffehlers des HST kam es praktisch nicht zum Einsatz und musste im Dezember 1993 der Korrekturoptik COSTAR weichen.

Die aktuelle Ausrüstung des HST

Zur Zeit verfügt das HST über vier wissenschaftliche Hauptinstrumente, die fünfte Geräteposition wird noch von der nicht mehr benötigten Korrekturoptik COSTAR eingenommen (Abb. 3). An Bord sind die Weitfeld/Planetenkamera-2 (WF/PC-2), die Advanced Camera for Surveys (ACS), der Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS), und die Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer (NICMOS).

■ **WF/PC-2:** Bei der bereits im Dezember 1993 installierten WF/PC-2 handelt es sich um eine in der Detektortechnik und Elektronik verbesserte Version der originalen WF/PC. Allerdings wurde sie aus Kostengründen mit nur vier statt acht Bildkanälen ausgerüstet. Daher weisen die Bilder eine eigentümliche V-Form auf. Die drei Weitfeldkameras WF-1, -2, -3 mit $f/12.9$ verfügen über ein Blickfeld von 2.5×2.5 Bogenminuten und erreichen eine Auflö-

sung von 0.1 Bogensekunden pro Pixel. Die Planetenkamera PC mit $f/28.3$ verfügt über ein Blickfeld von 35×35 Bogensekunden und erreicht eine Auflösung von 0.046 Bogensekunden pro Pixel. Alle vier Kamerakanäle verwenden einen CCD-Chip mit 800 Zeilen \times 800 Pixel. Der Spektralbereich erstreckt sich von 115 bis 1100 Nanometern, insgesamt stehen 48 Filter auf zwölf Filterrädern zur Verfügung. Am empfindlichsten ist die WF/PC-2 im sichtbaren Licht um 600 Nanometer. Die meisten veröffentlichten HST-Bilder entstanden mit diesem Gerät.

■ **ACS:** Die Advanced Camera for Surveys ist das jüngste Instrument an Bord des HST, sie ersetzte im März 2002 die Faint Object Camera. Sie verfügt über drei Kamerakanäle mit unterschiedlichen Blickfeldern. Der Weitfeldkanal besitzt ein Blickfeld von 202×202 Bogensekunden und verwendet zwei CCDs mit je 4096 Zeilen \times 2048 Pixel. Er deckt einen Spektralbereich von 370 bis 1100 Nanometern ab und erreicht eine Auflösung von 0.05 Bogensekunden pro Pixel. Der *High Resolution Channel* (HRC) mit einem Blickfeld von 29×26 Bogensekunden verwendet ein CCD mit 1024 Zeilen \times 1024 Pixel und erreicht eine Auflösung von 0.027 Bogensekunden pro Pixel. Der Spektralbereich erstreckt sich von 200 bis 1100 Nanometern. Der *Solar Blind Channel* SBC mit 35×31 Bogensekunden Blickfeld ist im Bereich von 115 bis 170 Nanometern empfindlich. Er teilt sich die Optik mit dem HRC. Er verfügt über eine Auflösung von

0.032 Bogensekunden pro Pixel. Als Detektor dient ein Multi-Adonen Mikrokanal Array, ein Photonen-zähler.

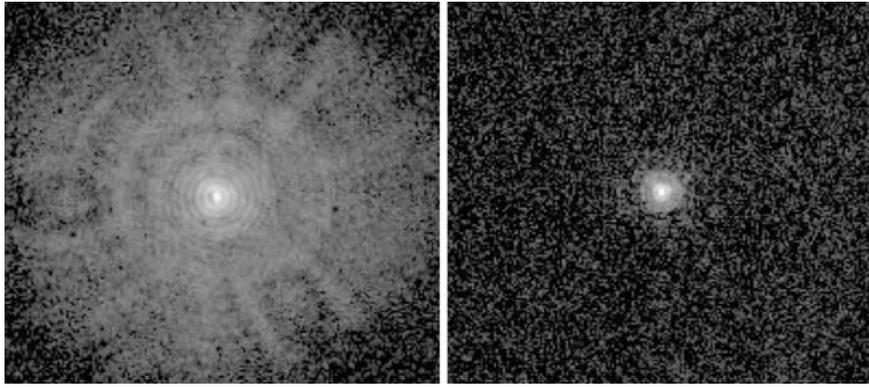
■ **STIS:** Der Space Telescope Imaging Spectrograph kann sowohl räumlich aufgelöste Bilder und Spektren im Bereich von 115 bis 1030 Nanometern mit einem Auflösungsvermögen zwischen 500 bis 17000 liefern, als auch höchst aufgelöste Spektren (30000 bis 110000) im Ultravioletten im Bereich von 115 bis 310 Nanometern. Er verfügt über ein Blickfeld von 52×52 Bogensekunden im Bildmodus, im hochaufgelösten Modus beträgt das Blickfeld 25×25 Bogensekunden.

■ **NICMOS:** Die Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer deckt einen Spektralbereich von 800 Nanometern bis 2500 Nanometern ab und erlaubt seit Februar 1997 Beobachtungen und Spektroskopie im Infraroten. Das Instrument verfügt über drei Bildkanäle mit unterschiedlichen Blickfeldern, die räumlich voneinander getrennt sind. NICMOS erlaubt erstmals Beobachtungen jenseits von 1100 Nanometern mit dem HST. In der Anfangszeit wurden die Detektoren mit einem Block aus gefrorenem Stickstoff gekühlt. Da aber das Gerät einen thermischen Kurzschluss aufwies, verbrauchte sich dieser Stickstoffblock schneller als erwartet, so dass nach etwa zwei Jahren NICMOS nicht mehr zu verwenden war. Erst im März 2002 wurde NICMOS mit einem aktiven Kühlsystem ausgestattet und läuft seitdem zufriedenstellend. T. A.



◀ Abb. 3: Das Weltraumteleskop HUBBLE verlässt die Nutzlastbuchse der Raumfähre DISCOVERY am 25. April 1990. (Bild: NASA-JSC)

▶ Abb. 4: Das erste veröffentlichte Bild des HST vom 25. Juni 1990 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Offenen Sternhaufens NGC 3532. Links: Bodengebundene Aufnahme des Las-Campanas-Observatoriums. Rechts: HST-Aufnahme mit der Weitfeld/Planetenkamera. (Bild: NASA/STScI)



▲ Abb. 5: Ein typisches Rohbild eines Sterns vor der Korrektur mit COSTAR (links) und danach. (Bild: NASA/ESA/STScI)

aufwies: Es zeigte eine ausgeprägte sphärische Aberration, die sich auch durch Justage der Optik nicht aufheben ließ. In der Bildebene wurden nicht wie gefordert etwa 70 Prozent des Lichts einer Punktquelle (Stern) auf eine Fläche von $20\ \mu\text{m}$ (0.1 Bogensekunden) gebündelt, sondern es kamen nur etwa 15 Prozent in diesem Bereich an (Abb. 5 links). Das restliche Licht verteilte sich auf einen Halo von $600\ \mu\text{m}$ und sorgte so für eine starke »Verschmierung« des Bildes.

Die Diagnose

Was war geschehen? Glücklicherweise war der Bau der Optik des HST gut dokumentiert worden, und alle Geräte zu ihrer Herstellung waren bei Perkin-Elmer noch vorhanden. So konnte schnell festgestellt werden, dass der Fehler beim Hauptspiegel gemacht worden war. Ein Messinstrument zur Kontrolle der Schliiffform war falsch zusammengebaut worden, so

dass der Hauptspiegel präzise falsch geschliffen worden war. Von innen nach außen war daher der Schliff des Hauptspiegels zunehmend zu flach geraten, am Rand wich er von der Idealform schließlich um 0.003 Millimeter ab. Dies sorgte dafür, dass das vom Rand des Spiegels kommende Licht erst 38 Millimeter unterhalb der vorgesehenen Brennebene gebündelt wurde. In gewisser Weise war das Weltraumteleskop also »kurzsichtig«.

Da die Gestalt des Spiegels sehr genau bekannt war, ließ sich bei hellen Punktquellen der Schlifffehler durch Bildverarbeitungsverfahren weitgehend »wegrechnen«, bei lichtschwachen Punktquellen versagte diese Methode. Auch die Empfindlichkeit und Auflösung der Spektrographen war stark beeinträchtigt. Kaum zu benutzen war das High-Speed Photometer, welches nach kurzzeitigen Schwankungen in der Helligkeit von Objekten Ausschau halten sollte.

Behandlungsmethoden

Nun, wo das Problem erkannt war, ging es daran, das Weltraumteleskop zu reparieren, ihm sozusagen eine »Brille«



w i s
wissenschaft in die schulen!

**Klaus Tschira Stiftung gGmbH,
Landesakademie für Fortbildung und
Personalentwicklung an Schulen,
Max-Planck-Institut für Astronomie**

ermöglichen jetzt durch ihre Kooperation die Entwicklung und Bereitstellung neuer praxisnaher Unterrichtsmaterialien für den Physikunterricht.

Ein erfahrener Mitarbeiter der Landesakademie entwickelt im Rahmen dieser Zusammenarbeit zur Zeitschrift **Sterne und Weltraum** passendes didaktisches Material. Der Praxistest erfolgt in den Lehrerfortbildungskursen der Landesakademie und in monatlichen Unterrichtsstunden an einer ausgewählten Stützpunktschule.

Sterne und Weltraum ist seit Herbst 2003 Partner der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!«. Diese Initiative des Spektrum der Wissenschaft Verlages bietet Schülern und Lehrern naturwissenschaftlicher Fächer kostenlos hochwertige didaktische Zusatzmaterialien für den Unterricht.

Weitere Informationen:

Wissenschaft in die Schulen

www.wissenschaft-schulen.de

Klaus Tschira Stiftung gGmbH

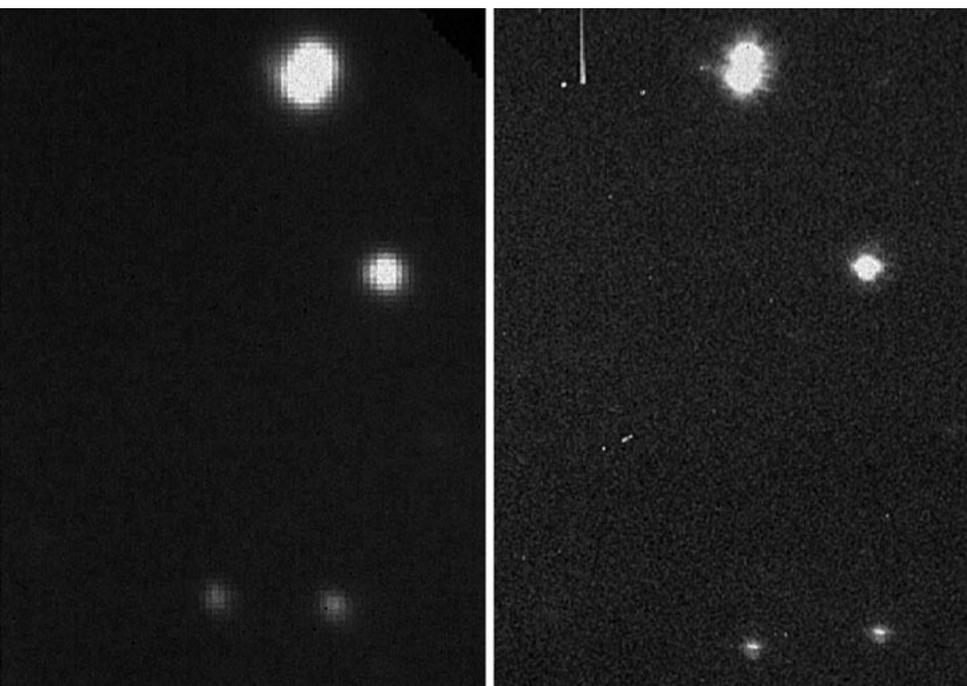
www.kts.villa-bosch.de

Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen

www.sal-ds.vs.bw.schule.de

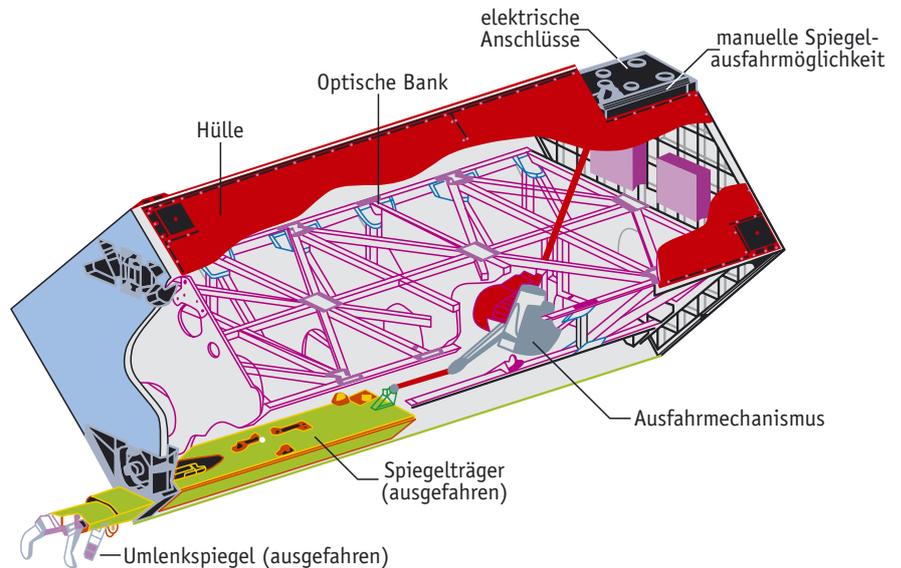
Max-Planck-Institut für Astronomie

www.mpia-hd.mpg.de



**Wissenschaft
in die Schulen!**

► Abb. 6: Übersichtgraphik der Korrekturoptik COSTAR mit den wichtigsten Baueinheiten. Die grün dargestellten Teile beinhalten die eigentliche Korrekturoptik, siehe auch Abb. 7. (Bild: Ball Aerospace/SuW)



▼ Abb. 7: Test der Korrekturoptiken von COSTAR beim Hersteller Ball Aerospace.



ebene und erlaubte so dem Weltraumteleskop eine scharfe Sicht ins All (siehe auch SuW 12/1993, S. 863 ff.).

Die erste Servicemission

Am 2. Dezember 1993 war es schließlich so weit, die Raumfähre ENDEAVOUR hob zur ersten Servicemission ab. An Bord befanden sich sieben Astronauten, welche für diesen Flug besonders ausgiebig trainiert worden waren. Insgesamt wurden fünf Weltraumausstiege benötigt, um die diversen Reparaturen und Wartungsarbeiten am Weltraumteleskop durchzuführen (Abb. 8).

Neben dem Einbau der Korrekturoptik und der neuen Weitfeld/Planetenkamera mussten auch die beiden Solarzellen-Ausleger gewechselt werden. Diese heizten sich durch die Sonnenbestrahlung unerwartet stark auf. So kam es durch thermische Expansion und Kontraktion ihrer metallischen Trägerkonstruktion zu plötzlichen Ausschlägen, welche das ganze Teleskop in Schwingungen versetzten, und die Bilder vom Weltraumteleskop HUBBLE noch weiter beeinträchtigten. Außerdem wurden weitere Reparaturen an der Elektronik durchgeführt, für Details siehe SuW 3/1994, S. 181 ff. Am 10. Dezember 1993 setzte die Raumfähre ENDEAVOUR das Weltraumteleskop nach Abschluss aller Arbeiten wieder aus, nun begann das gespannte Warten auf die Ergebnisse.

No more trouble with HUBBLE

Am 13. Januar 1994 konnten die Verantwortlichen der NASA auf einer Pressekonferenz freudestrahlend verkünden: »The trouble with HUBBLE is over!« Tatsächlich lieferte nun das Weltraumteleskop phantastische Bilder mit nie zuvor gesehener Schärfe, erst jetzt konnte die Arbeit richtig aufgenommen werden (Abb. 10, s. auch SuW 3/1994, S. 183).

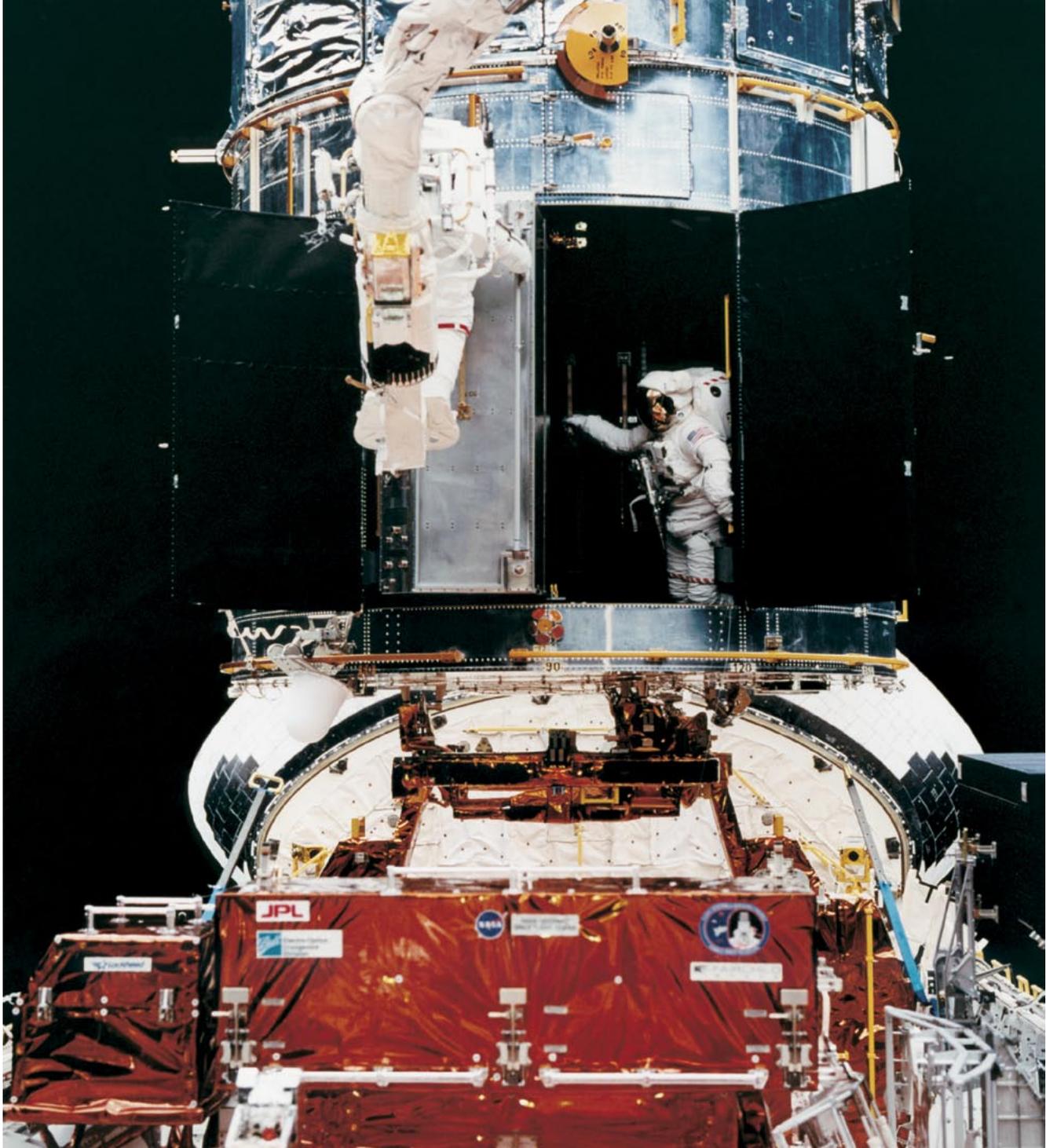
zu verordnen. Eine Rückholung auf die Erde mit der Raumfähre und ein erneuter Start erschien zu aufwändig und war vor allem viel zu teuer. Glücklicherweise war das Weltraumteleskop ja von vornherein auf Wartung im All durch Astronauten ausgelegt worden (siehe Kasten ab Seite 24). So kam man bei der NASA schnell überein, dem HST eine interne Korrekturoptik zu verordnen. Allerdings musste man dafür eines der vier Hauptinstrumente im hinteren Teil des Weltraumteleskops opfern. Die Wahl fiel schließlich auf das High Speed Photometer.

Die Korrekturoptik erhielt den Namen COSTAR für *Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement* und wurde von der Firma Ball Aerospace in Boulder, Colorado,

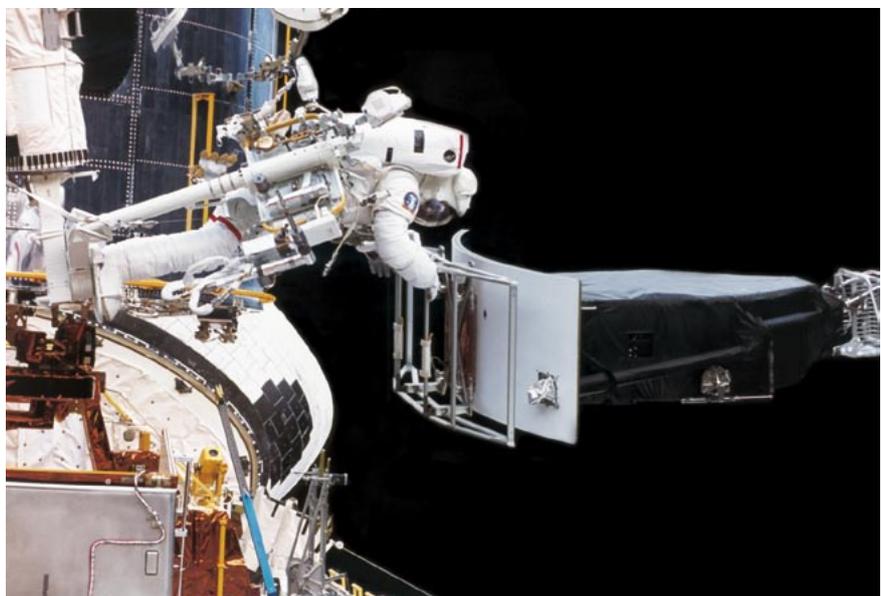
in nur 28 Monaten entwickelt, gebaut und getestet (Abb. 6 u. 7).

COSTAR konnte für die drei anderen Hauptinstrumente den Strahlengang wieder »zurechtbiegen«, die Weitfeld/Planetenkamera WF/PC wurde durch ihr bereits in der Entwicklung befindliches verbessertes Nachfolgeinstrument WF/PC-2 ersetzt. In dieses wurde die Korrekturoptik bereits eingebaut. COSTAR verwendete für jedes Instrument zwei Umlenkspiegel, einer besaß eine einfache sphärische Form, der andere hatte eine hochkomplex geformte Oberflächenform, eine »anamorphe Asphäre vierter Ordnung auf toroidalem Träger« (Abb. 7).

Dieser Spiegel sorgte für eine Vereinigung der Lichtstrahlen in der Brenn-



▲ Abb. 8: Die Astronauten der Mission STS-31 beim Einbau der Korrekturoptik COSTAR (silberner Kasten in der Bildmitte) am 8. Dezember 1993. (Bild: NASA-JSC)



▶ Abb. 9: Astronaut Jeffrey A. Hoffman mit der ausgebauten alten Weitfeld/Planetenkamera WF/PC-1, die neue WF/PC-2 ist bereits im HST eingebaut. (Bild: NASA-JSC)



Seitdem sind mit dem Weltraumteleskop viele aufsehenerregende Beobachtungen gelungen, schon im ersten Jahr nach der Reparatur konnte das HST die Einschläge des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf dem Jupiter beobachten (Abb. 11). Da diese unerwartet heftig ausfielen, gelang es mit dem HST die Feuerbälle der Explosionen, welche auf der erdabgewandten Seite des Jupiter stattfanden, zu photographieren, da diese sogar über den Horizont stiegen.

Die zweite Servicemission

Mehr als dreieinhalb Jahre waren nach der Reparatur vergangen, als die zweite Servicemission durchgeführt wurde. Diesmal hob am 11. Februar 1997 die Raumfähre DISCOVERY ab. Auf dem Plan standen vor allem der Austausch von zwei der drei verbliebenen Hauptinstrumente durch modernere und leistungsfähigere Geräte, und es sollten kleinere Reparaturen an der elektronischen Ausrüstung des Weltraumteleskops durchgeführt werden. Der Faint Object Spectrograph wurde durch STIS, den *Space Telescope Imaging Spectrograph* ersetzt, der Goddard High Resolution Spectrograph tauschte seinen Platz mit NICMOS, der »*Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*«, welche erstmals Beobachtungen tief im Infraroten mit dem HST erlaubte (für technische Einzelheiten siehe Kasten ab Seite 24). Da beide Geräte über interne Korrekturspiegel verfügen, wurden die Spiegel von COSTAR für die Vorgängergeräte wieder eingefahren. Nur noch die Faint Object Camera der ESA nutzte noch COSTAR. Alle Austausche und Reparaturen verliefen während der fünf Weltraumausstiege nach Plan und das HST konnte bald wieder mit der Arbeit beginnen.

Allerdings kam es im darauffolgenden Jahr zu größeren Problemen mit den Gyroskopen zur Ausrichtung und Lagekontrolle für das Weltraumteleskop. Auch ei-

▲ Abb. 10: Aufnahmen des Zentrums der Spiralgalaxie M100 vor der Korrektur (links) und nach der Korrektur (rechts). Die Steigerung der Bildschärfe ist offensichtlich. (Bild: NASA/STScI)

▼ Abb. 11: Jupiter am 18. Juli 1994 mit dem Einschlagsfleck des Fragments »G« des Kometen Shoemaker-Levy 9 von zweifacher Erdgröße. (Bild: NASA/STScI)





▲ Abb. 12: Das Weltraumteleskop HUBBLE schwebt nach der dritten Servicemission im Dezember 1999 über der Erde, der Objektivdeckel wird gerade geöffnet. (Bild: NASA-JSC)

ner der Feinausrichtungssensoren machte ernsthafte Probleme. Die Situation verschlechterte sich zusehends und die wissenschaftliche Arbeit geriet in Gefahr.

Für das Jahr 1999 hatte die NASA einen weiteren Flug zum HST vorgesehen, der eine sehr lange Liste an Arbeiten am Weltraumteleskop vorsah. Die Verantwortlichen für die bemannten Raumflüge wiesen schließlich darauf hin, dass das Programm für einen Raumfährenflug zu umfangreich sei und überarbeitet werden müsste, um die Astronauten und das Weltraumteleskop nicht in Gefahr zu bringen. Daher entschloss man sich, die dritte Servicemission auf zwei Raumfährenflüge aufzuteilen.

Die dritte Servicemission, Teil 1

Am 13. Dezember 1999 machte sich schließlich die Raumfähre DISCOVERY erneut auf den Weg zum HST. Diese Mission hatte den Charakter eines Rettungsfluges, da sich seit dem 13. November 1999 nach Ausfall eines vierten Gyroskops das Weltraumteleskop in einem »Safe mode« befand und keinerlei Beobachtungen mehr durchführen konnte. Der Objektivdeckel war geschlossen und das Teleskop wurde mit den Solarzellen grob in Richtung zur Sonne gerichtet. Allererste Priorität hatte also der Austausch der Kreiselssysteme und der Einbau eines leistungsfähigeren Bordcomputers für die Steuerung des Weltraumteleskops HUBBLE. Außerdem wurde ein Datenrekorder auf Magnetbandbasis durch einen Halbleiter-Massenspeicher mit der zehnfachen Kapazität des Vorgängers ersetzt. Daher konnte das HST

nun sehr viel mehr Daten für die Übertragung zur Erde zwischenspeichern. Für die Arbeiten wurden insgesamt drei Weltraumausstiege benötigt.

Die dritte Servicemission, Teil 2

Der Flug der Raumfähre COLUMBIA am 1. März 2002 diente vor allem der Leistungssteigerung des Weltraumteleskops. Nach fast zwölf Jahren im All stand der Ersatz der Faint Object Camera der ESA durch die wesentlich leistungsfähigere *Advanced Camera for Surveys* (ACS) an. Die FOC wurde ausgebaut und zur Erde zurückgebracht, und kann heute im Weltraumzentrum ESTEC der ESA in Noordwijk, Holland, besichtigt werden. Außerdem wurde bei NICMOS ein neues Kühlsystem installiert, nachdem der Vorrat an Stickstoffeis zur Kühlung der Sensoren durch einen thermischen Kurzschluss unerwartet früh zur Neige gegangen war und das Gerät seit fast drei Jahren nutzlos war. Die Solarzellenausleger wurden durch modernere ersetzt, diesmal bestanden sie statt eines komplizierten Ausrollmechanismus aus steifen Platten, die von den Astronauten nach der Montage einfach aufgeklappt wurden. Auch diese Wartungsmmission mit fünf Weltraumausstiegen verlief erfolgreich.

Das Weltraumteleskop HUBBLE heute

Auch zur Zeit ist das Weltraumteleskop HUBBLE noch voll im Einsatz. Allerdings ist es um die technische Gesundheit des Geräts nicht sehr gut bestellt, insbesondere die Gyroskope zur Ausrichtung machen wieder Probleme. Das HST verfügt über insgesamt sechs Gyroskope, von denen für den Routinebetrieb mindestens drei benötigt werden. Zwei von ihnen sind endgültig außer Betrieb, ein drittes arbeitet ungenau, und bei einem vierten Gyroskop deuten sich auch schon Probleme an. Daher wurde schon

testweise versucht, das HST mit nur zwei Kreiseln zu betreiben, was aber gewisse Einbußen und Einschränkungen bei der Ausrichtgenauigkeit mit sich bringt.

Eigentlich sollten diese Probleme keine so großen Schwierigkeiten bereiten, da für das Jahr 2006 eine vierte Servicemission geplant war. Diese sollte eine neue Weitfeld/Planetenkamera (WF/PC-3) und einen leistungsfähigen Spektrographen zum Weltraumteleskop bringen und alle Kreisel austauschen. Aber ob diese Mission jemals stattfinden wird, ist mehr als ungewiss. Am 1. Februar 2003 war die Raumfähre COLUMBIA beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre über Texas auseinander gebrochen, wobei die siebenköpfige Mannschaft ums Leben kam. In der Folge wurden alle Raumfährenflüge, die nicht mit der Internationalen Raumstation ISS zusammenhängen, als zu risikoreich angesehen.

Im Januar 2004 wurde der Projektleitung des HST offiziell mitgeteilt, dass der damalige NASA-Administrator Sean O'Keefe den Flug gestrichen habe. Als Ersatz wurde eine Mission mit ferngesteuerten Robotern vorgeschlagen, aber auch diese ist wegen der viel zu hohen Kosten aufgrund des großen technischen Entwicklungsaufwands mittlerweile wieder vom Tisch. Zur Zeit ist eine Art Raketentrucksack in Planung, welcher an das Weltraumteleskop andocken, und es nach Ablauf von einigen Jahren kontrolliert zum Absturz über dem Pazifik bringen soll. Ein unkontrollierter Absturz wäre heikel, da zumindest der aus Glas bestehende Hauptspiegel den Wiedereintritt überstehen und wie ein Meteorit auf der Erdoberfläche einschlagen würde.

Zur Zeit ist allerdings über die Zukunft des Weltraumteleskops HUBBLE kaum eine sichere Aussage möglich, da der seit kurzem im Amt befindliche neue NASA-Administrator Michael Griffin einen bemannten Wartungsflug zum HST nicht mehr kategorisch ausschließt. Das Weltraumteleskop ist auch jenseits der Astronomie wohl noch für einige Überraschungen gut. □



Tilmann Althaus promovierte 1999 an der Universität Potsdam über die Geochemie der Edeltgase. Ab 2001 un-

tersuchte er in Heidelberg die Edeltgase des Pannonischen Beckens (Ungarn). Seit Mai 2002 ist er Redakteur von *Sterne und Weltraum*.