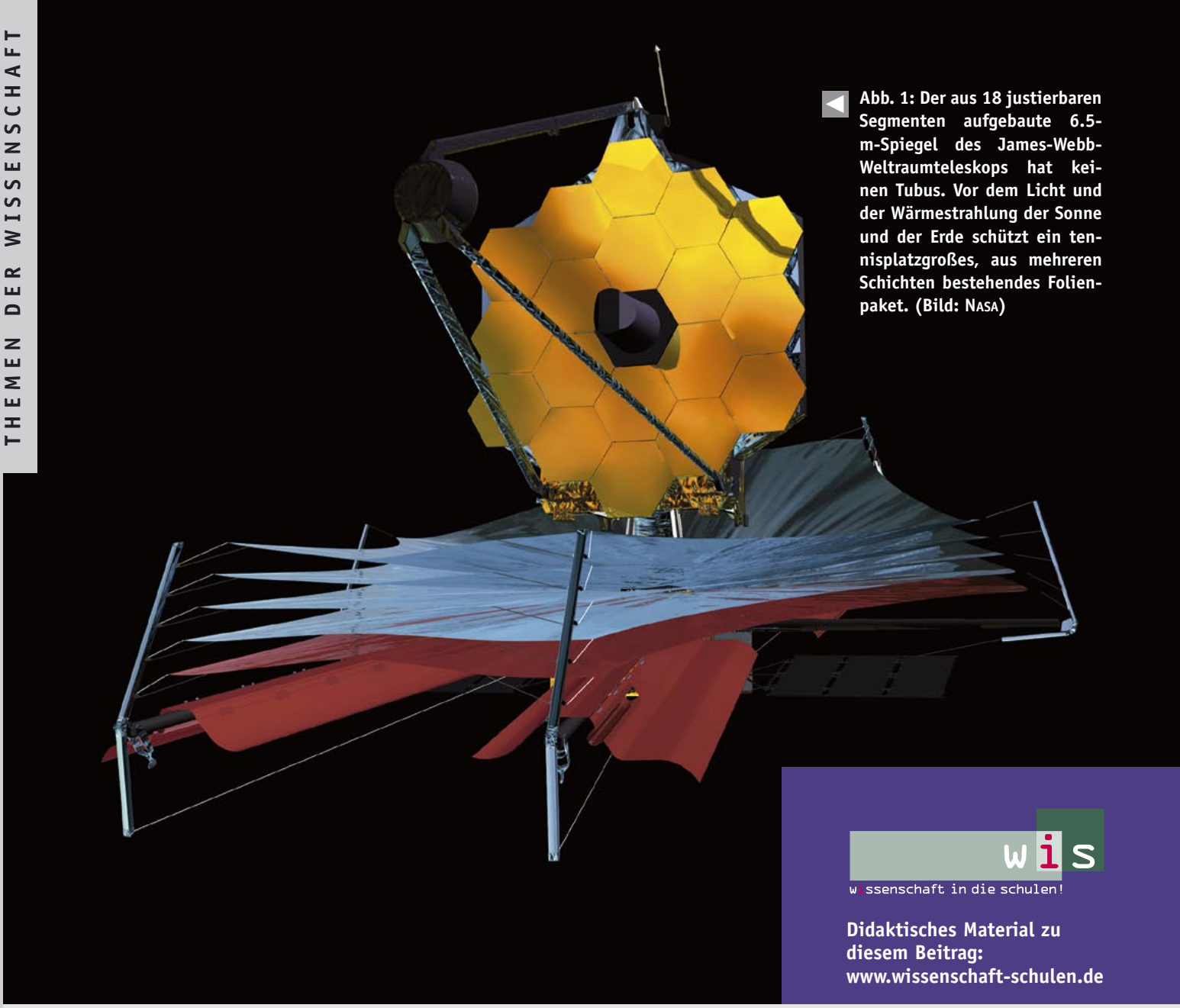


Abb. 1: Der aus 18 justierbaren Segmenten aufgebaute 6.5-m-Spiegel des James-Webb-Weltraumteleskops hat keinen Tubus. Vor dem Licht und der Wärmestrahlung der Sonne und der Erde schützt ein tennisplatzgroßes, aus mehreren Schichten bestehendes Folienpaket. (Bild: NASA)

wis
wissenschaft in die schulen!

Didaktisches Material zu diesem Beitrag: www.wissenschaft-schulen.de

HUBBLES Nachfolger: Das James-Webb-Weltraumteleskop

Räderwerke für Weltraumkälte sind »made in Germany«

VON DIETRICH LEMKE

Im Sommer 2013 soll ein Nachfolger für das Weltraumteleskop HUBBLE gestartet werden. Das Next Generation Space Telescope – nun unter dem Namen James Webb Space Telescope (JWST) bekannt – wird im Infraroten beobachten und rund 1.5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt im Weltraum platziert sein. Die Astronomen erhoffen sich von diesem neuen Observatorium Einblicke in die frühesten Phasen der Entwicklung unseres Universums.

Auch Weltraumteleskope altern: Ihre Sonnenzellen liefern im Laufe der Jahre weniger Strom, die Kreisel der Lageregelung fallen nacheinander aus, elektronische Bauteile können durch die hochenergetische Kosmische Strahlung beschädigt werden und Mechanismen lassen sich irgendwann nicht mehr bewegen.

Aber Weltraumteleskope altern nicht nur während des Betriebs, sie sind bereits zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme veraltet. Denn ihre technische Auslegung muss schon einige Jahre vor dem Start festgeschrieben werden. Der rasche Fortschritt bei elektronischen Kameras, Rechnern und Speichern, in der Regelungstechnik und bei Materialien lässt sich dann nicht mehr berücksichtigen. Folglich sieht ein nur wenige Jahre betriebenes Weltraumteleskop im Wortsinne alt aus, gemessen an dem, was heute möglich wäre.

Das alles ist vorhersehbar, und deshalb begann auch schon wenige Jahre nach dem 1990 erfolgten Start des Weltraumteleskops HUBBLE (HST) die Planung seines Nachfolgers, des »Next Generation Space Telescope« (NGST). Dieses neue Gerät soll die Leistungen seines berühmten Vorgängers weit übertreffen.

»Erstes Licht« als Ziel

Es ist eine im letzten Jahrhundert vielfach bestätigte Erfahrung: Sobald eine Leistungsgröße eines astronomischen Instruments um das etwa Zehnfache gesteigert wird, folgen bedeutende Entdeckungen im Universum. Das Weltraumteleskop HUBBLE hat diese Regel eindrucksvoll bestätigt. Empfindlichkeit und räumliche Auflösung dieser »Wissenschaftsmaschine« sind jeweils eine Größenordnung besser als bei vergleichbar großen erdgebundenen Teleskopen. Damit konnten beispielsweise die Monde des Planeten Pluto, die jüngsten Sterne mit ihren Staubscheiben im Orionnebel und die fernsten Galaxien bei einer Rotverschiebung von $z \approx 6$ abgebildet werden. Die Liste der mit HUBBLE getätigten Entdeckungen ist beeindruckend lang.

So ist denn auch die Aussicht auf zahlreiche weitere überraschende Entdeckungen eine Triebfeder für den Bau des NGST. Gleichwohl wird das Pflichtenheft für seine Leistungsdaten von einer Reihe klar zu benennender wissenschaftlicher Ziele bestimmt. Das wichtigste ist die Beobachtung des »ersten Lichts« im Universum, also des Lichts der ersten Sterne beziehungsweise Galaxien. Zwischen dem frühesten Bild des Kosmos im Alter von rund 300000 Jahren nach dem Urknall (bei einer Rotverschiebung von $z \approx 1000$) und dem HUBBLE Ultra Deep Field mit sehr weit rotverschobenen Galaxien bei $z \approx 6$, also im kosmischen Alter von einer Milliarde Jahren, liegt das bisher unbeobachtbare »Dunkle Zeitalter« des Kosmos (siehe Abb. 2 auf Seite 28).

Während dieser Ära müssen aus dem sich abkühlenden Feuerball des Universums die ersten Sterne entstanden sein. Sie bestanden nur aus Wasserstoff und Helium und waren vermutlich sehr heiß ($T > 50000$ Kelvin) und massereich ($M \geq 100$ Sonnenmassen). Wegen ihrer hohen Leuchtkraft war der Brennstoffvorrat rasch aufgebraucht, viele explodierten als Supernovae und reicherten dabei mit den in ihrem Inneren erbrüteten schwereren Elementen (den »Metallen«, wie Astronomen alle Elemente schwerer als Helium nennen) das frühe Universum an. Die hohe Temperatur der ersten Sterne hatte zur Folge, dass ihre Strahlung das dunkle neutrale Gas ionisierte. Aus diesem Plasma konnten sich große Strukturen, die späteren Galaxien, zusammenballen.

Mit den empfindlichsten (oder »tiefsten«) Aufnahmen des Universums lassen sich heute die letzten zwölf Milliarden Jahre seiner Entwicklung überblicken. Selbst die fernsten und somit jüngsten Galaxien haben bereits beachtliche Ausmaße, wie das HUBBLE Ultra Deep Field eindrucksvoll belegt. Folglich müssen die ersten leuchtenden Objekte (Sterne, Galaxien und Quasare) noch deutlich früher entstanden sein. Theoretiker vermuten, dass dies bei Rotverschiebungen von $z \approx 8 - 20$, also bereits wenige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall geschah.

Mit der Expansion des Universums vergrößern sich auch die Wellenlängen des ursprünglich im ultravioletten und sichtbaren Bereich ausgestrahlten Lichts. Damit sind die ersten Galaxien im Sichtbaren gar nicht mehr zu beobachten. Ihre Strahlung ist in den Bereich des nahen Infrarot (1 – 5 µm) und mittleren Infrarot (5 – 30 µm) verschoben. Wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit sehen wir die ersten Objekte jetzt im Infraroten, so wie sie vor fast 13 Milliarden Jahren im Ultravioletten ausgesehen haben.

Besuch in einer Zeit, als die Galaxien jung waren

Aus diesem Grund wurde das Next Generation Space Telescope bereits seit 1995 als reines Infrarot-Weltraumteleskop geplant. Im Jahre 1997 erschien die begeisternde Denkschrift »Besuch in einer Zeit, als die Galaxien jung waren«. Hier wurde die wissenschaftliche und technische Machbarkeit der Mission überzeugend dargelegt. Lediglich die Kostenerwartungen waren damals etwas schön gerechnet (»billiger als HST«). Nach breiter Diskussion des Vorhabens bei internationalen Tagungen und Begutachtungen in den USA erhielt das NGST im Jahre 2000 die höchste Dringlichkeit. Allerdings sollte es aus Kostengründen nicht mit dem ursprünglich angedachten 8-m-Spiegel, sondern nur mit einem 6.5-m-Spiegel ausgerüstet werden (Abb. 1). Im Jahr 2002 wurden drei Fokalebenen-Instrumente ausgewählt. Im gleichen Jahr benannte die NASA das NGST nach einem ihrer ehemaligen Verwaltungschefs in »James Webb Space Telescope« (JWST) um. Mit ihrem 85-Prozent-Anteil am Projekt hielt die NASA es offenbar für unnötig, ihre europäischen und kanadischen Partner zu fragen, ob nicht ein berühmter Wissenschaftler als Namenspate auch eine gute Wahl gewesen wäre.

Vier Schwerpunkte bilden die Richtschnur für die Entwicklung des JWST und seiner Instrumente:

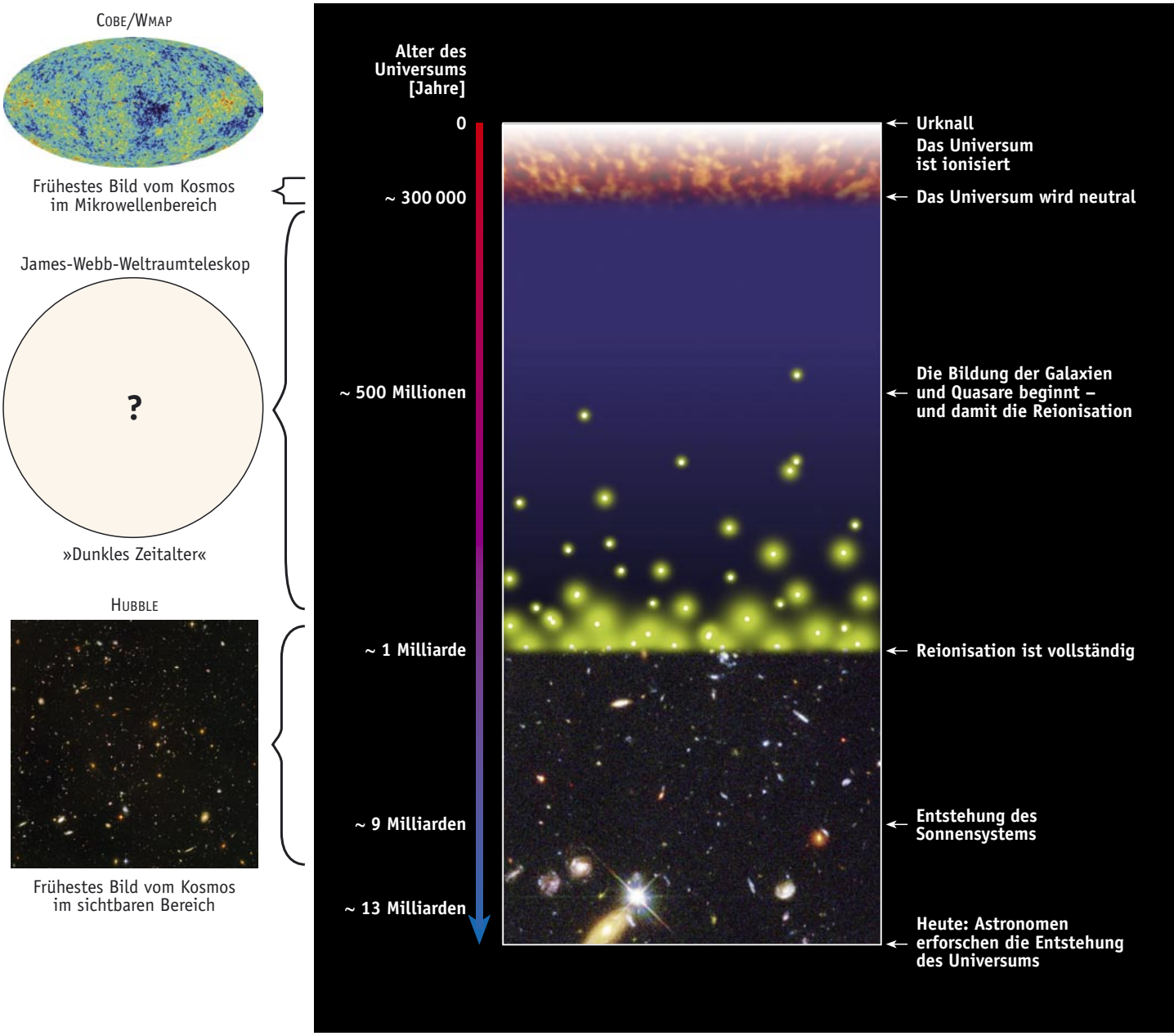
- Erstes Licht und Reionisation,
- Entstehung und Entwicklung der Galaxien,
- Entstehung von Sternen und protoplanetaren Systemen sowie
- Planetensysteme und Entstehung des Lebens.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht

wis

Im Weltraum herrschen extreme Umweltbedingungen. Materialien für Satellitenmissionen müssen deshalb besonderen Anforderungen genügen. Als Ergänzung zu diesem Beitrag zeigen wir Ihnen unter der Internetadresse **www.wissenschaft-schulen.de**, wie sich mit Hilfe eines häuslichen Testlabors (Tiefkühltruhe und sonnenbeschienene Fensterbank) demonstrieren lässt, dass verschiedene Stoffe auf Temperaturdifferenzen unterschiedlich reagieren. Zudem werden Fragen diskutiert wie »Warum kann man Space Shuttles nicht einfach nachmachen?« oder »Weshalb baut man Satelliten nicht beliebig groß?«. Weitere Themen sind die Entstehung von Licht, das elektromagnetische Spektrum sowie die Strahlung von hochrotverschobenen Objekten. Das Dreikörperproblem und Begriffe wie Hochvakuum und Strahlungsleitung werden ebenfalls behandelt.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.



Diese Themen mussten in eine lange Liste von genauen wissenschaftlichen Anforderungen umgesetzt werden, beispielsweise: »Messung der Raumdichte von Galaxien mit einer Nachweisgrenze von 1×10^{-34} Wm^{-2} Hz^{-1} bei einer Wellenlänge von 2 µm mittels Abbildungen im Wellenlängenbereich von 1.7 bis 27 Mikrometer und Bestimmung der Dichteveränderung als Funktion des Alters und des Entwicklungszustandes« oder »Messung der Spektren von mindestens 2500 Galaxien mit einer spektralen Auflösung von 100 (0.6–5 µm) und 1000 (1–5 µm) mit einer Nachweisgrenze im Emissionslinienfluss bei 2 µm von 5.2×10^{-22} Wm^{-2} und Bestimmung ihrer Rotverschiebung, Metallizität, Sternentstehungsrate, sowie Ionisationsgrad des interstellaren Mediums«.

Diese Liste mit insgesamt 40 detaillierten wissenschaftlichen Anforderungen bestimmt die genaue Auslegung der drei wissenschaftlichen Instrumente und des Teleskops sowie die Missionsplanung. Sie hat sich aber zugleich als effektiver Schutz vor ständigen Einsparwünschen während der vieljährigen Entwicklung erwiesen. Der jüngste Vorschlag, den Spiegeldurchmesser auf vier Meter zu reduzieren, würde die strengen wissenschaftlichen Anforderungen unterlaufen: Das »erste Licht« im Universum wäre so nicht mehr nachweisbar. Doch dazu später mehr …

Drei große Infrarot-Instrumente: NIRCAM, NIRSPEC und MIRI

Die Near-Infrared Camera NIRCAM ist eine Kamera mit 40 Megapixeln für den Wellenlängenbereich von 0.6 bis fünf Mikrometer. Sie kann in mehreren Breit- und Schmalbandfiltern Felder von 4.4 × 2.2 Quadratbogenminuten abbilden und als Koronograph benutzt werden. Gleichzeitig fungiert sie als Wellenfrontsensor, der die Ausrichtung der 18 Segmente des 6.5-m-Hauptspiegels misst. Marcia J. Rieke von der Universität von Arizona in Tucson leitet die Entwicklung des Instruments, das bei Lockheed-Martin gebaut wird. Das Aufspüren der frühesten Galaxien und Quasare, der fernsten Supernovae und von Objekten im Kuiper-Gürtel um die Sonne gehören zu den Entdeckungszielen. In Sternentstehungsgebieten und bei protoplanetaren Scheiben werden mit dem 6.5-m-Spiegel des JWST ähnlich scharfe Abbildungen im Staub durchdringenden Infrarotlicht möglich, wie wir sie vom »kleinen« HUBBLE-Spiegel aus dem Sichtbaren kennen (Abb. 3).

Der Near-Infrared Spectrograph NIRSPEC ist ein Spektrometer für das nahe Infrarot, das mit einer niedrigen und einer hohen Auflösung betrieben werden kann: $\lambda/\Delta\lambda \approx 100$ und 1000. Es erlaubt die simultane Spektroskopie von mehr als 100 Objekten in seinem 3 × 3 Quadratbogenminuten großen Feld. Für die Auswahl der

Abb. 2: Nicht alle Entwicklungsphasen des Universums vom Urknall (oben) bis heute (unten) sind der Beobachtung zugänglich. Mikrowellenexperimente wie die Satelliten COBE und WMAP lieferten ein Bild vom Zustand der Welt im Alter von rund 300 000 Jahren. Die letzten zwölf Milliarden Jahre lassen sich mit bodengebundenen Großteleskopen und dem Weltraumteleskop HUBBLE erfassen. Dazwischen liegt das »Dunkle Zeitalter« des Kosmos, in dem die ersten Sterne und Galaxien entstanden. Diese Lücke soll das James-Webb-Teleskop schließen. (Quelle: S. G. Djorgovski et al./Digital Media Center/CALTECH)

Abb. 3: Ein Blick in das Innere der im fernen Infraroten und im Submillimeterbereich entdeckten Sternentstehungswolken war bisher nicht möglich. Das hohe Auflösungsvermögen und die hohe Empfindlichkeit des Instruments MIRI werden das Studium der warmen Protosterne im Inneren der kalten Wolken erlauben. In der Quelle VLA 1623 beispielsweise (links) werden sich mit MIRI Einzelheiten wie Staubscheiben und beginnende Planetenentstehung sowie polare Ausflüsse (Jets) erkennen lassen. Das rechte Bild zeigt unsere Erwartungen nach gängigen theoretischen Modellen zusammen mit dem Auflösungsvermögen von MIRI (bei 7 µm) und zum Vergleich die Plutobahn. (Bild: MIRI-Konsortium/SuW)

interessierenden Objekte wird gegenwärtig eine Siliziumscheibe mit kleinen elektrisch ansteuerbaren Mikroverschlüssen entwickelt (ähnlich einem Adventskalender). Durch die geöffneten Türchen gelangt jeweils nur das Licht einer zu messenden Galaxie. Dieser Multiobjekt-Spektrograph wird von der europäischen Raumfahrtbehörde ESA entwickelt und von dem Unternehmen EADS Astrium in Deutschland gebaut. Hierzu trägt auch das Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg bei.

Mit NIRSPEC können die Wissenschaftler Eigenschaften von Galaxien und Quasaren verschiedenen Alters untersuchen, beispielsweise Rotverschiebungen, Elementhäufigkeiten, Anregungsbedingungen und Raumgeschwindigkeiten. Auch die Reionisation des neutralen Gases, das sich rund 300 000 Jahre nach dem Urknall durch Zusammenlagern von Atomkernen und Elektronen gebildet hatte, durch die energiereiche Strahlung der ersten heißen Sterne lässt sich studieren.

Das komplexeste der drei Instrumente ist MIRI. Dieses Mid-Infrared Instrument besteht aus einer Kamera mit Koronographen und einem Spektrometer für den Bereich des mittleren Infrarot (5 – 28 µm). Es wird von einem Konsortium europäischer Institute, darunter dem MPIA, gebaut. Lediglich Detektoren und die zugehörige Kühlmaschine kommen von der NASA. Die Leitung des Projekts haben Gillian Wright vom Astronomischen Technologiezentrum ATC in Edinburgh (Schottland) und George H. Rieke von der Universität von Arizona in Tucson inne.

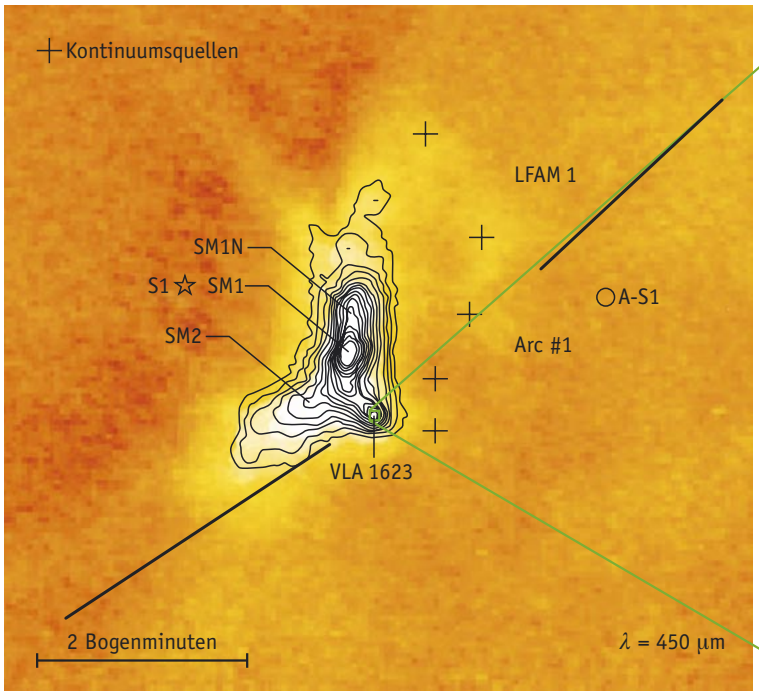
MIRI wird die frühesten Objekte im Universum zweifelsfrei identifizieren können. Dabei wirkt es eng mit NIRCAM zusammen: Auf den großflächigen NIRCAM-Aufnahmen werden sich Objekte finden lassen, die möglicherweise sehr jung (also sehr weit rotverschoben) sind. Deren sichere Klassifizierung ist aber nur über die wichtigen diagnostischen Spektrallinien möglich, die vom Sichtbaren in den nur mit MIRI zugänglichen Wellenlängenbereich des mittleren Infrarot fallen (Abb. 4).

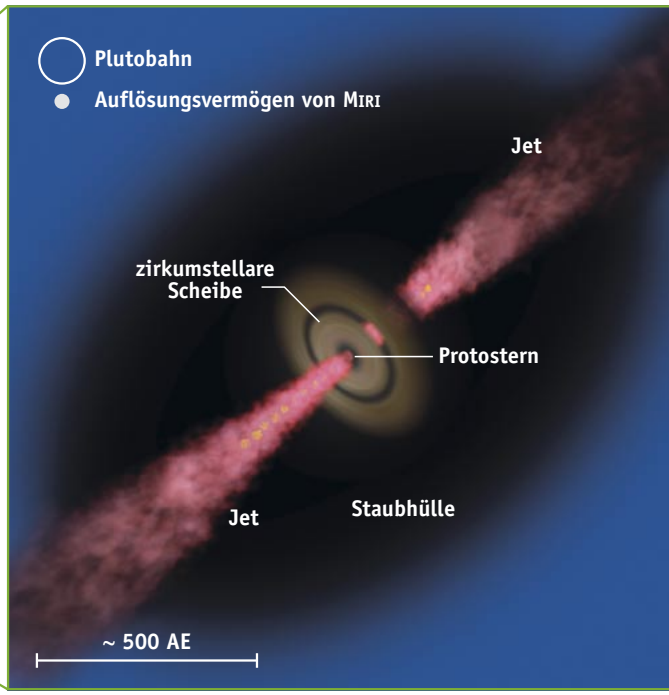
Neben den drei großen Instrumenten NIRCAM, NIRSPEC und MIRI wird auch die Sternsensorkamera des JWST für wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt. Sie erhält ein Filterrad für die schmalbandige Wellenlängenauswahl ($\lambda/\Delta\lambda \approx 100$) im Bereich zwischen 1.6 und 4.9 Mikrometer. Durch den viel einfacheren Strahlengang ist dieser »Tunable Filter Imager« (TFI) der Kanadischen Weltraumbehörde deutlich empfindlicher als NIRCAM und kann damit schneller auf sehr junge Galaxien mit ihren stark rotverschobenen Lyman-Alpha-Linien aufmerksam machen.

Räderwerke für Weltraumkälte

Gemeinsam ist den drei Fokalebenen-Instrumenten für das JWST, dass sie im Kryovakuum betrieben werden müssen. Für NIRCAM und NIRSPEC reicht eine Temperatur von –240 °C aus. MIRI hingegen muss unter –260 °C gekühlt werden, damit nicht seine eigene Wärmestrahlung die kosmische Infrarotstrahlung überblendet. MIRIS Infrarotdetektoren müssen sogar bei –268 °C, also bei nur fünf Kelvin betrieben werden, um den Dunkelstrom der Kamera hinreichend klein zu halten.

Ebenfalls gemeinsam ist den Instrumenten, dass sie alle über große »optische Wechselräder« verfügen, auf deren Umfang viele Gitter, Filter, Strahlteiler, Spie-





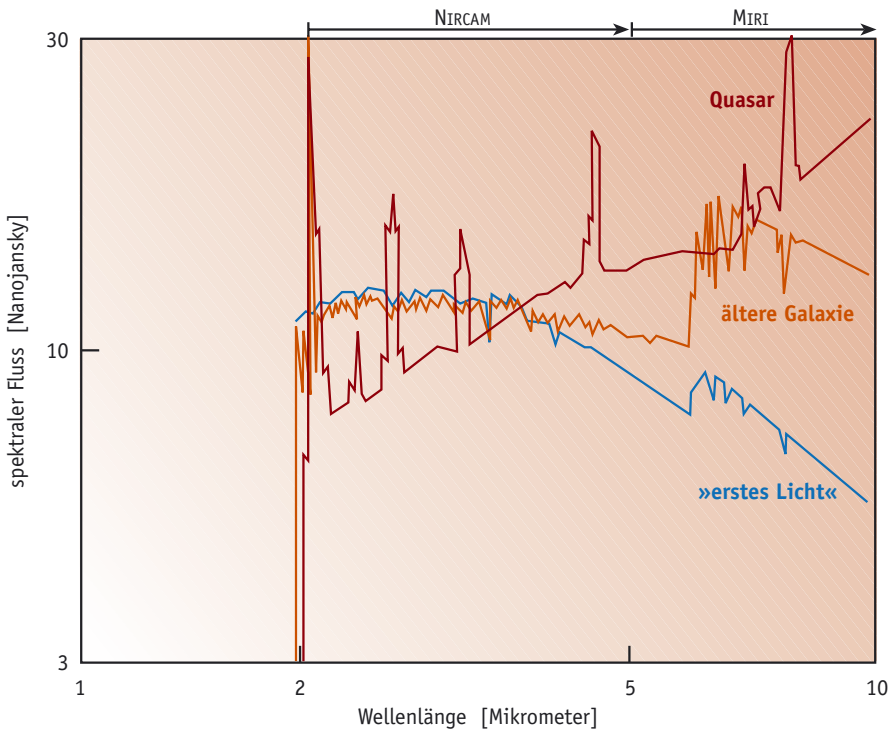


Abb. 4: Das Licht der Quasare und Galaxien im frühen Universum ist so weit rotverschoben, dass wir es heute im nahen und mittleren Infrarot registrieren. Mit NIRCAMs großflächigen und empfindlichen Kameras für den Bereich zwischen zwei und fünf Mikrometer lassen sich mögliche junge Objekte identifizieren. Allerdings unterscheiden sich die Spektren von »echten« ersten Galaxien und solchen nach einer Sternentstehungsperiode im nahen Infrarot nur geringfügig. MIRI hingegen ermöglicht die genaue Klassifizierung aufgrund der stark unterschiedlichen Spektren im Bereich von fünf bis 28 Mikrometer. Die gezeigte Simulation wurde für eine Rotverschiebung von $z \approx 15$ berechnet. (Quelle: MIRI-Konsortium).

gel, Prismen und Koronographenmasken angeordnet sind (Abb. 5). Durch Drehen der Räder werden sowohl die verschiedenen Betriebsarten der Instrumente (Spektroskopie, Abbilden, Koronographie, Kalibrierung) als auch die einzelnen Wellenlängenbereiche ausgewählt. Obwohl jeder Weltraumtechniker solche prinzipiell störungsanfälligen Mechanismen zu vermeiden sucht, sind leistungsfähige wissenschaftliche Instrumente ohne bewegte Teile nicht machbar.

Im europäischen MIRI-Konsortium, zu dem 21 Institute beitragen, hat das MPIA seit dem Jahre 2002 die Entwicklung der beiden Gitterräder und des Filterrades übernommen. Zu den hohen Anforderungen an diese Mechanismen zählen:

- höchste Zuverlässigkeit und genaueste Positionierung für hunderttausende Bewegungen,
- geringste elektrische Antriebsleistung, um Erwärmung zu vermeiden,
- Vibrationsfestigkeit beim Raketenstart (~ 40 g),
- Betrieb sowohl im Kryovakuum als auch unter Laborbedingungen,
- Betriebszeit mehr als zehn Jahre,
- sicheres Anlaufen auch nach langem Stillstand sowie
- schnelle und kostengünstige Verfügbarkeit.

Die Arbeitsgruppe »Infrarot-Weltraumteleskope« des MPIA hat langjährige Erfahrungen beim Bau solcher Kryomechanismen erworben. Für das Instrument ISOPHOT des europäischen Satelliten ISO baute das Institut gemeinsam mit den Firmen Carl Zeiss und Dornier drei optische Wechselräder, die während der 29 Monate währenden Mission bei einer Temperatur von –270 °C hunderttausende von Bewegungen mit großer Genauigkeit ausgeführt haben. Zudem entwickelte das MPIA für ISOPHOT und für das Instrument PACS des europäischen Weltraumobservatoriums HERSCHEL Fokalebenen-Chopper, die ebenfalls bei –270 °C hunderte Millionen von Bewegungen zuverlässig ausführen konnten.

Diese Entwicklungs- und Testerfahrung möchte das MPIA auf MIRI und NIRSPEC übertragen, wobei die Herausforderungen nun größer werden: Die Wechselräder für das JWST sind um ein Vielfaches größer und schwerer, die Genauigkeitsanforderungen noch höher. Insbesondere müssen die Räder wegen des Starts des JWST bei normalen Umgebungsbedingungen im gesamten Temperaturbereich von +20 °C bis –265 °C und von Normaldruck bis Hochvakuum funktionieren.

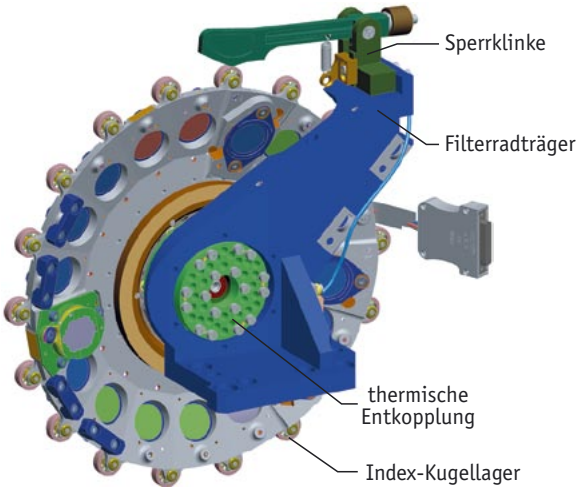
Der Antrieb aller Räder für MIRI und NIRSPEC erfolgt nach dem bei ISOPHOT bewährten Sperrklinkenprinzip. Abb. 5 zeigt als Beispiel das Filterrad für MIRI. Auf dem äußeren Rand befinden sich 18 kleine Kugellager, entsprechend der Zahl der einzustellenden Positionen. Ein keilförmiges Element an einem beweglichen Hebel rastet zwischen zwei Index-Kugellagern ein und legt so die Position des Rades mit einer Wiederholgenauigkeit von ungefähr einer Bogensekunde fest. Den getriebelosen Antrieb übernimmt ein Torquemotor, der durch einen elektrischen Puls um etwa 15 Grad bewegt wird, sodass die Spitze des Rastkeils das benachbarte Kugellager überfahrt. Die genaue Positionierung kann dann stromlos durch die Federkraft der Raste erfolgen oder sogar sanft elektrisch gebremst.

Durch dieses Antriebsprinzip ist keine Rückkopplung von einer elektrischen Positionsanzeige und auch kein Haltestrom erforderlich, da stets zuverlässig mechanisch positioniert wird. Für jeden Schritt werden je nach Radgröße kleine Bruchteile einer Wattsekunde aufgebracht. Da zwischen dem ungefähr eine Sekunde dauernden Antriebsschritt und der langen astronomischen Messzeit (1000–10000 Sekunden) keinerlei Strom fließt, ist die mittlere elektrische Verlustleistung dieses Antriebsprinzips praktisch vernachlässigbar klein. Die Duplex-Kugellager der zentralen Achsen werden zur Genauigkeitssteigerung als integrierte Lager ausgeführt, das heißt einer der Ringe ist auch Lagerachse. Die Laufbahnen werden mit einer dünnen Schicht Molybdändisulfid (MoS_2) belegt. Sie verhindert die Kaltverschweißung im Hochvakuum und bietet gute Schmiereigenschaften bei tiefen Temperaturen. Als zusätzlichen Schutz erhielten alle Kugeln eine dünne Titancarbid-Beschichtung.

Aufwändige Modellphilosophie

Um dem heutigen Zeitplan gemäß im Jahre 2008 Filter- und Gitterräder höchster Qualität und Zuverlässigkeit abliefern zu können, wird der bei Weltraumexperimenten bewährte schrittweise Entwicklungsweg verfolgt. Bereits 2004 bauten die Werkstätten des MPIA Prototypen der Räder, 2005 folgten die Entwicklungsmodelle. Bis 2007 entstehen die Qualifikationsmodelle, an denen mittels umfangreicher Tests die volle Raumflugtauglichkeit nachgewiesen werden muss. Im Jahre 2008 folgen dann die abzuliefernden Flugmodelle aller Räder, während gleichzeitig die Qualifikationsmodelle durch

Abb. 5: Auf den 18 Positionen des Filterrades für das Mid-Infrared Instrument (MIRI) befinden sich Filter für den Wellenlängenbereich von fünf bis 28 Mikrometer und ein Prisma für empfindliche niedrig auflösende Spektroskopie. An letzterem ist die Universiät zu Köln beteiligt. Mehrere Koronographenmasken erlauben die Suche nach Planeten neben einem sehr hellen Stern, dessen Licht ausgeblendet wird. Das Rad wird mit einem zentralen Torquemotor bewegt und mit einer in einen äußeren Kugellagerkranz einrastenden Sperrklinke positioniert. (Bild: CEA, TTL, ADR, Zeiss, MPIA)



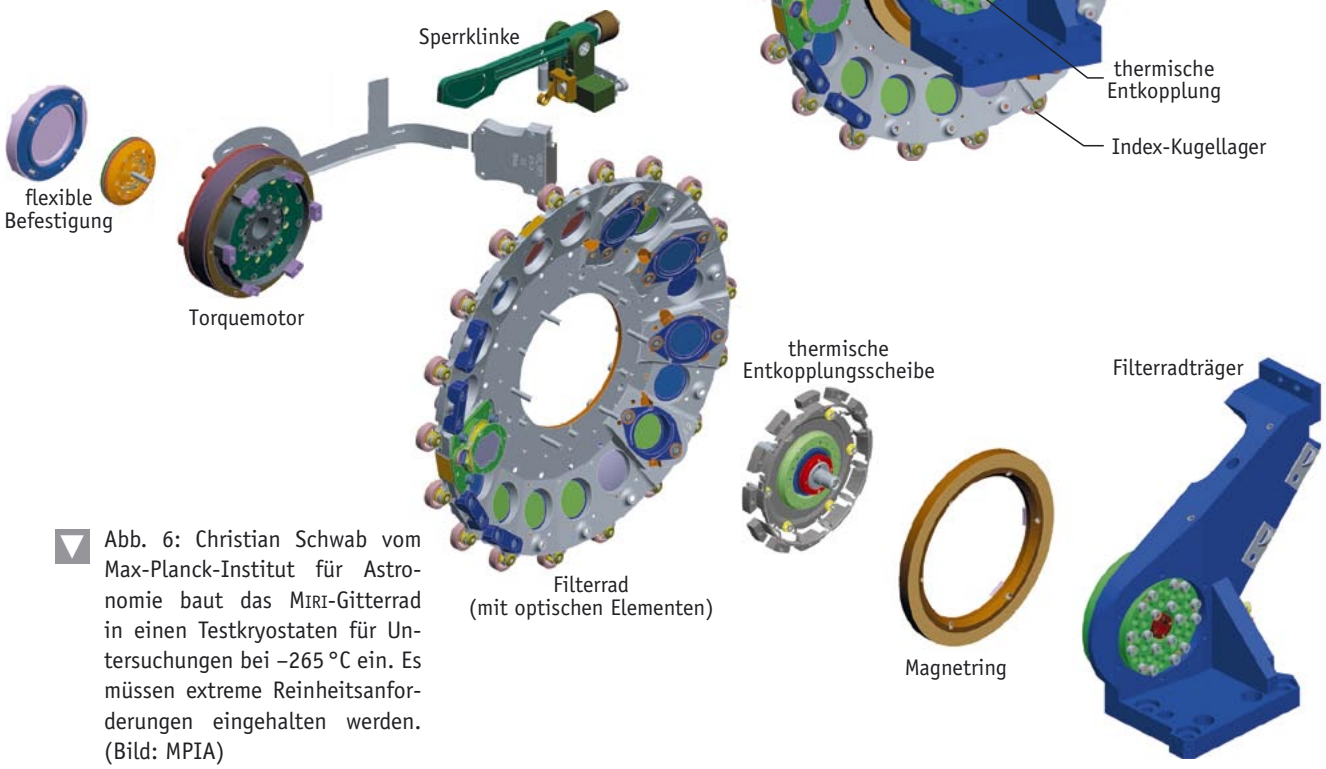


Abb. 6: Christian Schwab vom Max-Planck-Institut für Astronomie baut das MIRI-Gitterrad in einen Testkryostaten für Untersuchungen bei –265 °C ein. Es müssen extreme Reinheitsanforderungen eingehalten werden. (Bild: MPIA)

Austausch mehrerer Komponenten zu Flugersatzeinheiten nachgerüstet werden. Nur diese aufwändige Modellphilosophie gewährleistet, dass auf den teuren Raumflugmissionen ausgereifte, höchst zuverlässige Technik zum Einsatz kommt. Jedes der erwähnten Modelle wird monatelang unter allen geforderten Umweltbedingungen getestet, verbessert, wieder getestet und im nächsten Schritt mit noch hochwertigeren Bauteilen ausgerüstet.

Die im Jahr 2005 im MPIA aufgebauten Entwicklungsmodelle erfüllten bei Kryovakuumtests bereits wesentliche Anforderungen wie hohe Positionsgenauigkeit und geringer Leistungsbedarf (Abb. 6). Aber auch unerwartete Schwächen tauchten auf. So neigten die integrierten Duplex-Kugellager zur Verschmutzung durch Mikropartikel, was ihre Reibwerte erhöhte. Eine thermische Entkopplungsscheibe zwischen den Stahlbauteilen und der Aluminiumstruktur zeigte Kaltversprödung ihrer flexiblen Elemente bei –260 °C. Und die Titancarbid-Beschichtung der Kugeln widerstand den hohen mechanischen und thermischen Belastungen nicht.

Soweit es der Zeitplan zulässt, werden die aufgetretenen Probleme beim gleichen Modell behoben. Länger dauernde Nachrüstungen können aber erst im Folgemodell eingesetzt werden; so benötigt beispielsweise der Hersteller der Kugellager fast ein Jahr, um geeignete unbeschichtete Kugeln einzupassen und Staubschutzblenden vorzusehen.

Viele Köche ...

Die Entwicklungsmodelle der Räder werden in den nächsten Monaten an das europäische MIRI-Konsortium geliefert und in ein so genanntes Verifikationsmodell des gesamten MIRI eingebaut. Dabei werden erstmals alle Untersysteme der 21 beteiligten Institute zusammengeführt.

Bereits die ersten Jahre der gemeinsamen Entwicklung haben gezeigt, wie schwierig die Koordination eines so großen Konsortiums ist. Es gibt zahllose Schnittstellen, die aufwändig festgelegt, überwacht und gegebenenfalls noch aufwändiger geändert werden müssen. Die Mechanismen aus dem MPIA haben Schnittstellen mit vielen ausländischen Instituten: das Kamerasystem und das optische Filterrad mit der Astrophysik-Abteilung der Französischen Atomenergiebehörde CEA in Saclay, das Strahlteilerrad

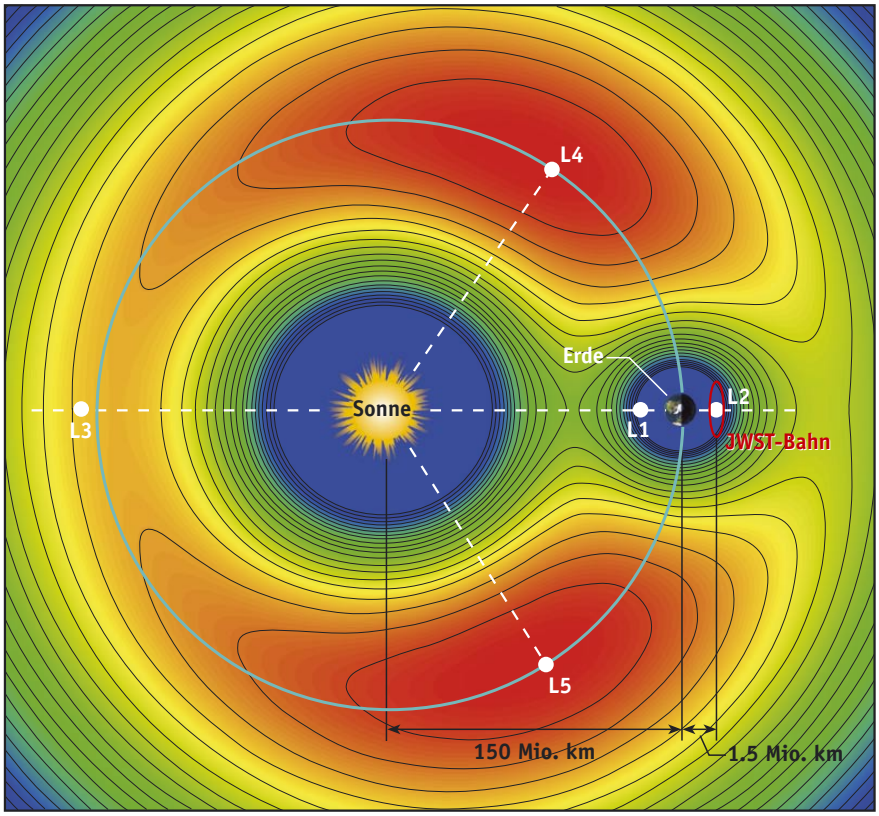


Abb. 7: An den fünf Lagrange- oder Librationspunkten L1 bis L5 befindet sich ein kleiner Körper im Gleichgewicht mit dem System Sonne–Erde (nicht maßstäblich). In L2 läuft ein Satellit mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit um die Sonne wie die Erde. Das James Webb Space Telescope wird allerdings nicht direkt in L2 stationiert, sondern wird diesen Punkt in gewissem Abstand umkreisen.

mit dem Astronomischen Technologiezentrum ATC in Edinburgh, das Gitterrad mit der Niederländischen Stiftung für Astronomische Forschung ASTRON in Dwingeloo, die Bordelektronik mit dem belgischen Raumfahrtzentrum CSL in Lüttich, die Verkabelung mit dem Paul-Scherrer-Institut in Villigen (Schweiz). Hinzu kommen zahlreiche weitere Kooperationen mit europäischen Institutionen.

Diese Zersplitterung ist eine Folge der europäischen Finanzierungsregeln im ESA-Wissenschaftsprogramm. Die ESA baut und betreibt die Satelliten, während die wissenschaftlichen Instrumente von den Mitgliedsländern finanziert werden. Der Principal Investigator eines großen Instrumentes mit Kosten von etwa 60 Millionen Euro erhält vielleicht ein Drittel der benötigten Mittel von seiner nationalen Raumfahrtagentur. Die restlichen Mittel muss er bei Co-Investigatoren in den übrigen europäischen Ländern »einsammeln«. Die bekommen aber von ihren Raumfahrtagenturen für solche Beteiligungen nur wenige Millionen Euro, und so können schließlich nur Konsortien mit vielen Mitgliedsinstituten ein größeres Instrument entwickeln.

Der Aufwand für die Koordination ist hoch – auch weil viele Institute Industriefirmen bei ihren Entwicklungen einschalten, die bei jeder Änderung ihren Aufwand erhöht sehen und oft Mehrkosten in Rechnung stellen. Druckmittel gegenüber einem säumigen Co-Investigator hat der europäische Principal Investigator nicht; er kann nicht in ausländische Finanzierungen und Industrieverträge eingreifen. So sind Disziplin und Kooperationswille im Konsortium wichtige Voraussetzungen, um das gemeinsame große Ziel zu erreichen. Die Finanzierung der Instrumentenentwicklungen aus einer Hand könnte viel Geld sparen.

Kooperation mit der Industrie

Das MPIA hat nach einem Ausschreibungsverfahren Mitte des Jahres 2005 das Angebot der Firma Carl Zeiss zum Bau der Qualifikations- und Flugmodelle der Räder für MIRI ausgewählt. Die Mittel für diesen industriellen Festpreis-Auftrag bewilligte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bonn.

Zusammen mit dem Auftrag für MIRI konnte ein Vertrag zu NIRSPEC, dem europäischen Spektrometer für das JWST, unterzeichnet werden. Dabei sind die Rollen vertauscht: Das MPIA trägt als »Unterauftragnehmer« zur Entwicklung der Gitter- und Filterräder für NIRSPEC bei. In dem von Carl Zeiss geführten Konsortium entwickelt das MPIA die elektrischen Komponenten wie Motoren und Positionssensoren. Auch wenn der Auftrag für NIRSPEC von Carl Zeiss an das MPIA kleiner ist als die Vereinbarung für MIRI, erwarten beide Seiten wegen vieler gemeinsamer Entwicklungsziele eine hohe Synergie.

Standort des Teleskops: L2

Wegen der gewaltigen Größe und der Masse von elf Tonnen kann nur die Ariane-5-Rakete das JWST in den Weltraum bringen. Kurz vor und unmittelbar nach dem für das Jahr 2013 vorgesehenen Start haben das Teleskop und insbesondere die in Heidelberg entwickelten Mechanismen kritische Phasen durchzustehen. Bei den letzten Überprüfungen aller Instrumente auf der Startrampe werden auch die Optikräder gedreht, nun aber bei einer Temperatur um +30 °C und eventuell feuchter Außenluft. Das erfordert sehr hohe Betriebsströme und kann die empfindlichen MoS_2-Schichten der Kugellager schädigen.

Nach dem Abheben der Rakete werden alle Mechanismen – die aus Gewichtsgründen grazil aufgebaut sind – starken Vibrationen ausgesetzt: Sie müssen Beschleunigungen vom 45fachen der Erdbeschleunigung aushalten. Erst wenn diese kritischen Stunden überstanden sind, beginnt der ruhige Flug durch den Weltraum, und nach und nach stellen sich die »Wohlfühlbedingungen« für die Mechanismen ein: Vakuum und tiefe Temperaturen. Jetzt kann die Bodenstation das vorsichtige Einlaufen der Räder kommandieren. Dabei wird die in den MoS_2-Schichten der Kugellager gefangene Luftfeuchtigkeit allmählich entfernt, und die Lagerreibung sinkt auf ein Drittel.

Ziel der Reise ist der Lagrange-Punkt L2 (Abb. 7 und 8). Dort, in 1.5 Millionen Kilometer Abstand von der Erde in Verlängerung der Verbindungslinie Sonne-Erde, wirkt auf einen Körper die gemeinsame Anziehungskraft von Sonne und Erde, sodass er trotz des größeren Sonnenabstandes genauso schnell um die Sonne läuft wie unser Heimatplanet. Das heißt, von der Erde aus sehen wir das JWST stets in antisolarer Richtung.

Doch obwohl der Lagrange-Punkt L2 eine Lösung des himmelsmechanischen Dreikörperproblems ist, wird man das JWST nicht exakt dort stationieren. Mindestens drei Gründe sprechen dagegen: Erstens ist L2 ein metastabiler Punkt, aus dem das Teleskop bereits durch kleinste Störungen vertrieben würde (vergleichbar einem »stabil« auf der Fingerkuppe aufgestellten Bleistift). Zweitens müssten für eine Stationierung direkt in L2 Brems-

manöver ausgeführt werden. Drittens würde der Satellit dort Sonnenfinsternisse erleiden, weil die Erde genau zwischen ihm und der Sonne stünde; dadurch wäre seine Energieversorgung gestört.

In der Praxis wählt man deshalb Schleifenbahnen um L2 (Abb. 8). Diese Lissajous'schen Bewegungen können sehr große Durchmesser haben: einige hunderttausend Kilometer in der Ekliptik und senkrecht dazu. Aus diesem Grund kann die Umlaufperiode um L2 ein halbes Jahr betragen und die Position des Satelliten von der Erde aus gesehen um bis zu 30 Grad von der Richtung zu L2 abweichen. Je größer der Durchmesser der Schleifen, desto einfacher sind die Bahnmanöver im Anflug und die späteren Bahnkorrekturen durchzuführen. Begrenzend sind aber die Streulichtanforderungen des tubuslosen Teleskops. Für große Winkelabstände von L2 kann der Strahlungsschild Sonne und Erde nicht mehr gleichzeitig abdecken. Unser Heimatplanet hat von L2 aus gesehen den gleichen Winkeldurchmesser wie die Sonne, und im mittleren Infrarot leuchtet die Erde hell!

Passive und aktive Kühlung

In der Nutzlastspitze der Ariane-5 ist das JWST eng zusammengefaltet; selbst der segmentierte Spiegel ist teilweise umgeklappt (Abb. 9). Wenige Tage nach dem Start werden mehr als hundert Scharniere, Motoren und Sensoren aktiviert, um den tennisplatzgroßen mehrschichtigen Strahlungsschild und das Teleskop aufzuspannen. Der Strahlungsschild verringert die Wärmestrahlung der Sonne um viele Größenordnungen: Aus 300 Kilowatt einfallender Leistung werden weniger als 0.1 Watt auf der Teleskopseite. Damit kühlt sich der Hauptspiegel passiv auf –240 °C ab, ausreichend tief für empfindliche Beobachtungen mit den Bordinstrumenten.

Der Strahlungsschild besteht aus fünf Schichten Kaptonfolie, die auf der jeweils sonnenzugewandten Seite mit Aluminium bedampft ist. Damit soll möglichst viel empfangene Strahlung in den Weltraum zurück reflektiert werden. Die sonnenabgewandte Seite der Folie ist mit Silizium belegt, das sich im Infraroten als schwarzer Strahler verhält und somit die Folie kühlt. Die Wärmestrahlung entweicht durch die 15 Zentimeter breiten Spalten zwischen den Folien (siehe Abb. 1 und Titelbild). Das Folienpaket muss Einschlägen von Mikrometeoriten, dem solaren Wind, der Kosmischen Strahlung, extremen Temperaturunterschieden und vielfältigen mechanischen Belastungen trotzen, um die millionenfache Strahlungsabschwächung für die gesamte Missionsdauer zu gewährleisten.

Die Kameras von MIRI müssen allerdings auf –268 °C (etwa 5 Kelvin) gekühlt werden. Hierbei hat es im Jahre 2005 eine einschneidende Änderung in der Entwicklung gegeben. Bis dahin wurde an einem Kryostaten mit festem Wasserstoff gearbeitet. Mit dieser einfachen und erprobten Technik konnte eine gerade ausreichende Betriebstemperatur von –267 °C erreicht werden. Aber der Kryostat erschien im Zuge der gewünschten Gewichtseinsparungen bald als zu schwer. Deshalb kommt nun eine mechanische Kühlmaschine zum Einsatz. Die motorbetriebene erste Kompressorstufe wird auf dem Satellitenteil des JWST angeordnet und über flexible Leitungen mit dem Kühlkopf in MIRI verbunden. Grundsätzlich ergeben sich Vorteile wie etwa tiefere Temperaturen, geringere Massen und fast unbegrenzte Betriebszeiten. Dem stehen aber Risiken bei Zeit und Kosten für die Entwicklung und Erprobung gegenüber; zudem ist der Einsatz dieser Technik selbst risikobehaftet, denn es gibt – im Gegensatz zum Weltraumteleskop HUBBLE – keine Möglichkeit, das JWST zu warten oder zu reparieren.

Kurskorrekturen bei der NASA

Im Jahr 2005 wurden alle Vorhaben der Weltraumastronomie in den USA auf den Prüfstand gestellt. Was war passiert? Mehrere der großen Vorhaben ließen beträchtliche Kostenüberschreitungen erwarten, so auch das JWST mit rund einer Milliarde Dollar. Insgesamt waren zu viele Projekte in der Planung, die mit dem stagnierenden Etat nicht mehr bedient wer-

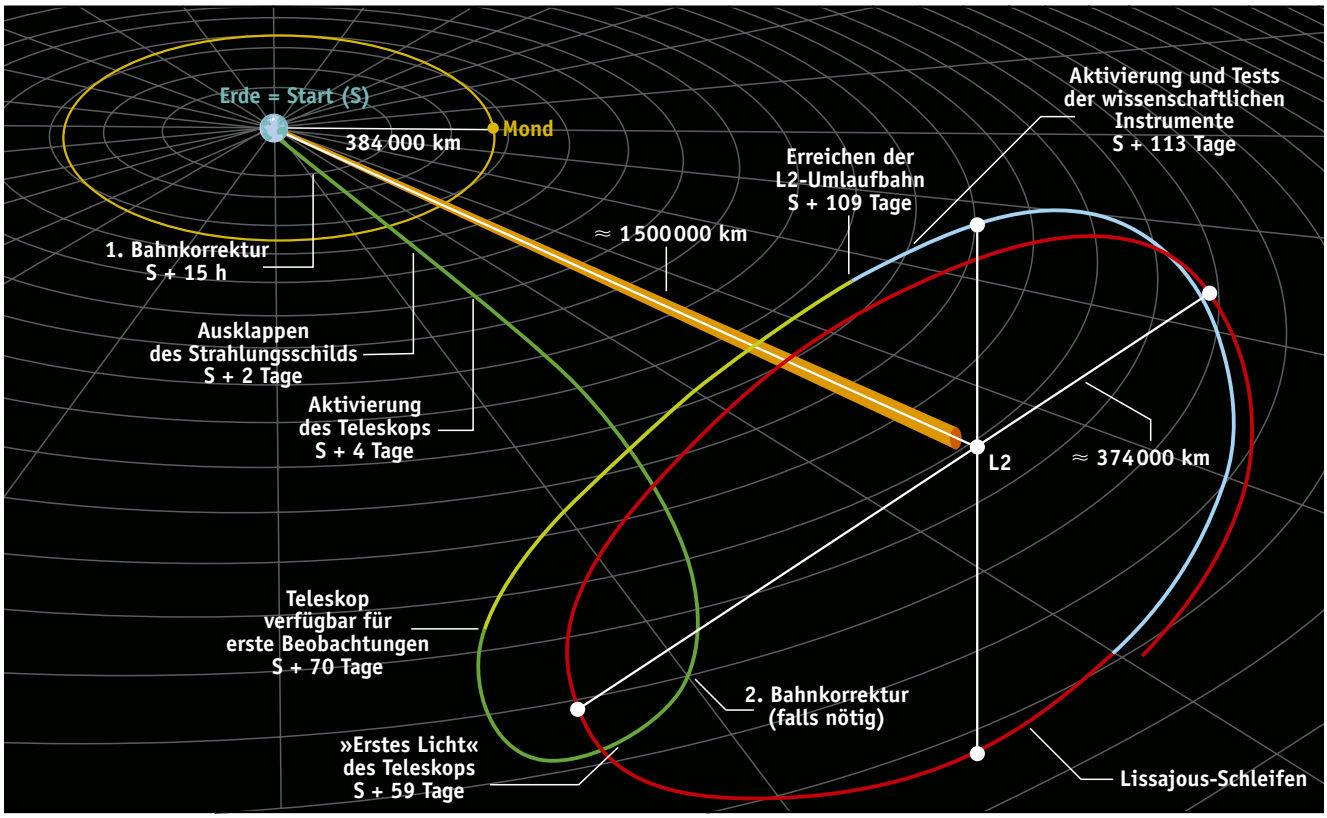


Abb. 8: Das James-Webb-Weltraumteleskop soll 109 Tage nach dem Start seine endgültige Bahn um den Lagrange-Punkt L2 erreichen. Danach beginnt der Testbetrieb der Instrumente. Da L2 metastabil ist, umkreist ihn das JWST in ausgedehnten Lissajous'schen Bahnen. (Bild: ESA/NASA)

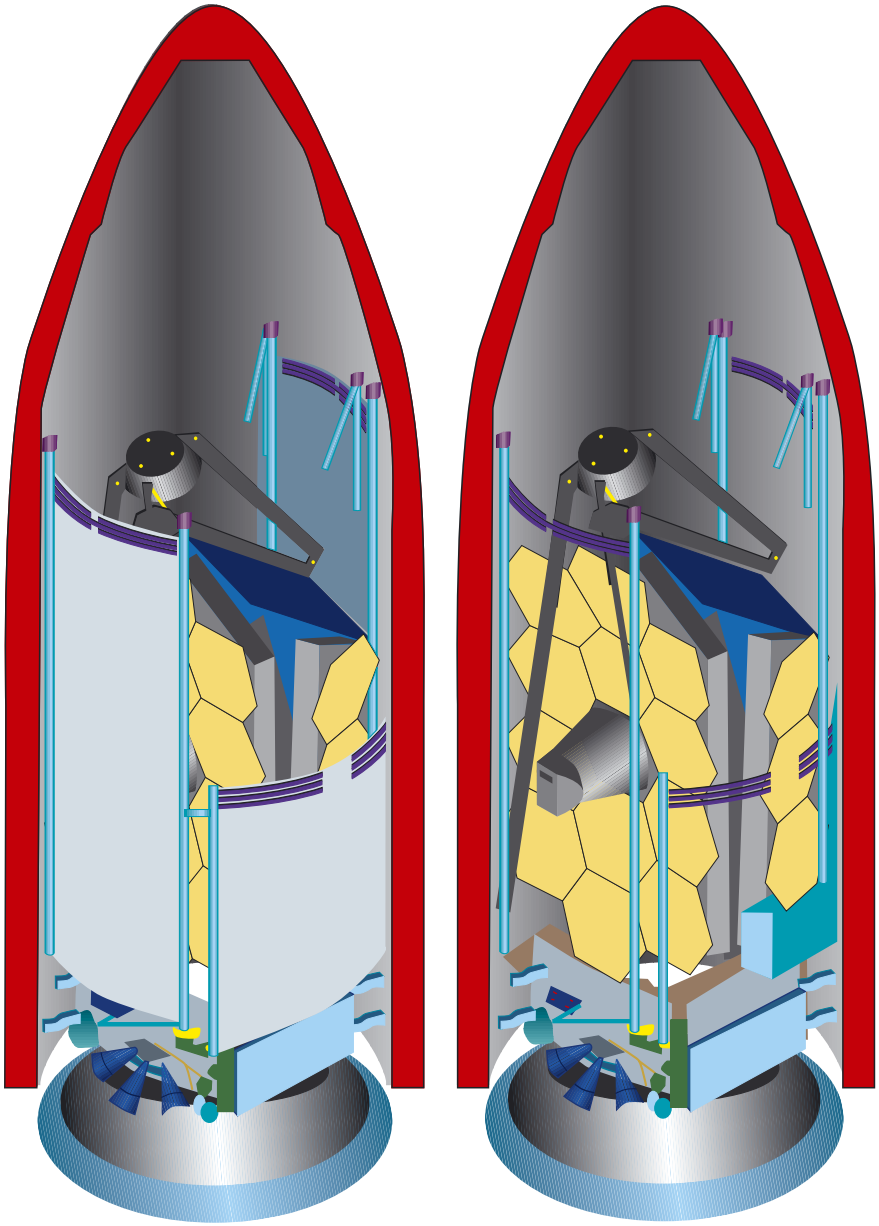


Abb. 9: Das 6.5-m-JWST-Teleskop und sein mehr als 30 m großer mehrschichtiger Strahlungsschild müssen für den Start vielfach gefaltet werden, um in der fünf Meter breiten Nutzlastspitze der Ariane-5-Rakete verstaut zu werden. Zwei Tage nach dem Start, auf der Reise zu L2, beginnt die Entfaltung. (Bild: ESA/NASA)

den konnten. Schließlich verkündete die US-Regierung neue politische Prioritäten: Wiederaufnahme der Shuttle-Flüge, Fertigstellen der Internationalen Raumstation, Entwicklung eines Nachfolgers für das Space Shuttle, bemannte Flüge zu Mond und Mars. Das musste zu einer Kürzung im ehrgeizigen wissenschaftlichen Programm führen.

Das JWST hatte als »First Light Machine« gute Chancen, weitergeführt zu werden, sollte aber zur Kostensenkung nur noch mit einem 4-m-Spiegel ausgerüstet werden. Erfreulicherweise haben alle damit befassten Gutachterausschüsse bestätigt, dass sich die wissenschaftlichen Hauptziele (wie Beobachtung des Lichts der ersten Sterne und Galaxien) dann nicht mehr erreichen ließen. So durfte das JWST seinen 6.5-m-Spiegel behalten, musste aber dennoch einige Federn lassen: Die volle optische Leistung wird erst bei Wellenlängen jenseits von 1.7 Mikrometern erreicht werden (nicht mehr im Roten, wie ursprünglich vorgesehen), die Sauberkeitsanforderungen an den Hauptspiegel wurden gemildert, um einfachere Testaufbauten zu erlauben. Letzteres kann zu etwas erhöhtem Streulicht im nahen Infrarot führen, ist aber für MIRI belanglos. Leider wurde wegen des sparsameren Mittelabflusses bei der NASA auch das Startdatum für JWST um zwei Jahre verschoben; jetzt ist es auf Sommer 2013 festgelegt.

Unterdessen hat im MPIA – parallel zum Bau der Mechanismen für MIRI und NIRSPEC – auch die Mitarbeit an der Planung aller Bodentests und der künftigen Eichung der Instrumente in den frühen Flugphasen begonnen. Die Arbeit in den internationalen Forscherteams, mit der Industrie, mit NASA und ESA begeistern nicht nur die beteiligten Wissenschaftler im MPIA, sondern auch viele Studenten. Ihre Diplom- und Doktorarbeiten speisen sich aus drei Quellen: der reichen wissenschaftlichen Ausbeute der ISO-Mission, Beobachtungsvorbereitungen für die bevorstehende HERSCHEL-Mission und anspruchsvollen instrumentellen Entwicklungen für die JWST-Mission.

Bei allen diesen Missionen wurden und werden Wissenschaftler des MPIA zusätzlich mit garantierter Beobachtungszeit vergütet. Die einzigartigen Beobachtungsmöglichkeiten mit dem JWST sind genau auf die beiden großen Forschungsgebiete des MPIA zugeschnitten: Kosmologie und Galaxienentwicklung einerseits und Stern- und Planetenentstehung andererseits. Die Mitwirkung an der vordersten Front der instrumentellen Entwicklung und die Teilhabe an den aufregenden wissenschaftlichen Forschungen werden das MPIA in die Lage versetzen, auch an Missionen mit noch größeren Teleskopen teilzunehmen, die für die Zeit nach 2015 angedacht sind. Dazu gehören ein 20-m-Flüssigspiegel in einem Mondkrater, ein etwa 100 Meter großes Interferometer aus mehreren 2-m-Satellitenteleskopen im Formationsflug und ein gekühltes Infrarot-Observatorium mit einem 10-m-Membranspiegel. □

Weitere Informationen

Donald Wiss: Die Langrange-Punkte. SuW 7/2003, S. 30 ff.

Dietrich Lemke: Das James Webb Space Telescope – Der Nachfolger des HST. SuW 7/2005, S. 34 f. Im selbem Heft auf Seite 22–33, 36–55 finden Sie Beiträge zum Weltraumteleskop HUBBLE.

Weblinks zu diesem Beitrag unter: **www.suw-online.de**

Dietrich Lemke ist am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg für die Entwicklung der extraterrestrischen Infrarotastronomie verantwortlich. Gemeinsam mit Thomas Henning leitet er am MPIA die Arbeiten zu MIRI. Das Institut ist zudem auch an NIRSPEC beteiligt; hier fungiert Hans-Walter Rix als Mission Scientist.