

SOFIA

Das stratosphärische Observatorium

Wie konstruiert man ein Flugzeugteleskop?

Das größte bisher gebaute Flugzeugobservatorium nimmt demnächst seinen regulären wissenschaftlichen Betrieb auf. Um das Teleskop, völlig losgelöst von allen Bewegungen des Flugzeugs, ungestört beobachten zu lassen, mussten zahlreiche technologische Hürden überwunden werden.

Von Hans Jürgen Kärcher

IN KÜRZE

- Flugzeugobservatorien vereinigen entscheidende Vorteile von Weltraumobservatorien und erdgebundenen Sternwarten: Sie beobachten aus einer Höhe von 15 Kilometern, und ihre Messinstrumente lassen sich permanent weiterentwickeln.
- SOFIA, gemeinsam von NASA und DLR entwickelt, ist mit seinem in einer Boeing 747 installierten 2,7-Meter-Teleskop das größte bisher gebaute Flugzeugobservatorium.
- Die Realisierung von SOFIA erforderte eine Reihe technologischer Durchbrüche, insbesondere zur mechanischen Entkopplung von Flugzeug und Teleskop.

SOFIA, das deutsch-amerikanische »Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie«, steht am Beginn seiner operativen Phase. Es wird in einer Flughöhe von 15 Kilometern im Infraroten arbeiten. Wozu in diesem Spektralbereich, und warum in so großer Höhe?

Ein zentraler astronomischer Themenkomplex steht heute im Brennpunkt des Interesses: der Kreislauf der interstellaren Materie, der die Geburt der Sterne und Planeten umfasst. Wichtige Phasen dieses Kreislaufs spielen sich bei tiefen Temperaturen ab und sind daher nur im Infraroten beobachtbar. Mit SOFIA werden sich diese Phasen in unserem Milchstraßensystem und in den benachbarten, nicht allzu weit entfernten Galaxien bis in zuvor unerreichbare Details untersuchen lassen..

Allerdings ist die Erdatmosphäre für Infrarotstrahlung weit gehend undurchlässig. Durch das optische Fenster zwischen 200 und 800 Nanometer Wellenlänge erreicht der Hauptteil der Son-

nenstrahlung den Erdboden weit gehend ungeschwächt – das ist lebenswichtig und hier liegt der Grund dafür, dass unsere Augen im Laufe der Evolution in diesem Wellenlängenbereich ihre maximale Empfindlichkeit entwickelt haben, und damit auch dafür, dass als Erstes die optischen Teleskope erfunden wurden (siehe die Grafik auf S. 44 oben).

Als Nächstes wurde, mit dem Aufkommen der entsprechenden Empfänger, das große Radiofenster im langwelligen Bereich den Astronomen zugänglich. Dazwischen – im nahen und mittleren Infrarot – stören zahlreiche Absorptionsbanden der Luftmoleküle. Erst wenn sich der Beobachter bis zur Stratosphäre erhebt, erreicht ihn die Infrarotstrahlung astronomischer Quellen weit gehend ungetrübt. Deshalb bringt man Infrarotteleskope am besten in Flugzeugen, in Ballongondeln oder auf Satelliten unter – alle drei Wege werden heute beschritten.

SOFIA ist das größte bis heute gebaute Flugzeugobservatorium. Warum nun ein

NASA / DLR





Am 14. Dezember 2009, über der Mojave-Wüste Kaliforniens, flog SOFIA erstmals mit offener Luke. Der 2,7 Meter große Hauptspiegel des Teleskops ist durch eine Textilplane vor der Sonnenstrahlung geschützt.

Flugzeug- und nicht gleich ein Weltraum-observatorium? Beides ist vergleichbar teuer, aber bei Betrieb und Wartung bestehen beträchtliche Unterschiede. Einmal gestartet, ist ein Weltraumteleskop nicht mehr direkt zugänglich, es lässt sich nur noch aus der Ferne steuern. Es muss also sehr zuverlässig gebaut sein, all seinen Treibstoff an Bord haben, und es lässt sich nicht nachrüsten. Da seine technischen Einrichtungen, etwa Elektronik und Empfänger, schnell altern, ist seine Lebensdauer auf einige Jahre beschränkt, oder es muss durch Wartungsmissionen immer wieder modernisiert werden – und das ist nach Beendigung des Space Shuttle-Programms praktisch nicht mehr möglich.

Dagegen lässt sich ein Flugzeugteleskop nach jedem Flug warten, bei SOFIA können mitfliegende Astronomen die wissenschaftlichen Instrumente sogar während des Flugs bedienen. Die Lebensdauer des Observatoriums beträgt planmäßig 20 Jahre, und jeder Astronom

kann es mit eigenen, technologisch und wissenschaftlich zeitgemäßen Empfangsgeräten benutzen. Das sind gewichtige Argumente, die für ein Flugzeugobservatorium sprechen.

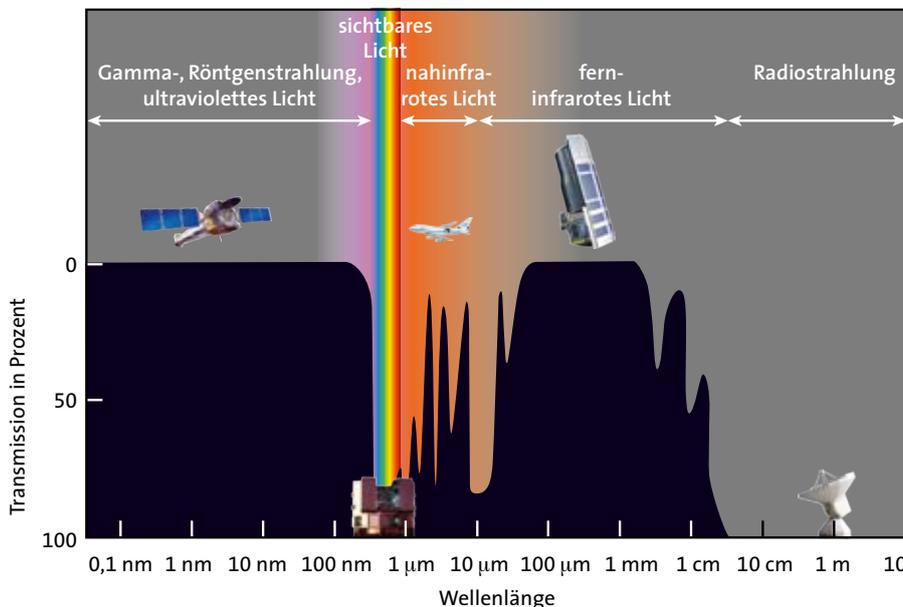
Im Folgenden möchte ich die speziellen technischen Probleme aufzeigen, die beim Bau eines Flugzeugteleskops zu lösen sind, und die Entwicklung und Konstruktion des SOFIA-Teleskops beschreiben.

Wie bringen wir das Teleskop im Flugzeug unter?

Zur Beantwortung dieser Frage gehen wir von SOFIAs Vorgängern aus. Denn SOFIA ist nicht das erste bisher realisierte Flugzeugobservatorium – allerdings ist es das mit Abstand größte (siehe Bild auf S. 44). Bereits in den 1960er Jahren hatte die NASA am Ames Research Center in Kalifornien ein 30-Zentimeter-Teleskop in einem Learjet betrieben, und von 1975 bis 1995, mit dem Kuiper Airborne Observatory (KAO), ein 90-Zentimeter-Teleskop in einem Lockheed C-141A-Flugzeug. Das

WIS wissenschaft in die schulen!

Zu diesem Beitrag stehen didaktische Materialien auf unserer Internetseite www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1072701 zur freien Verfügung. Im vorliegenden WIS-Material werden einige Aspekte der Arbeit des Ingenieurs herausgestellt. Dazu gehören der Umgang mit technischen Zeichnungen, die Auswahl geeigneter Werkstoffe und die Anwendung von Physik und Mathematik bei der Konstruktion.



Dieses Diagramm zeigt die Durchlässigkeit oder Transmission der Erdatmosphäre auf Meereshöhe in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Nur in schmalen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums ist die Lufthülle weit gehend durchsichtig. Im nahen und mittleren Infrarot stören zahlreiche molekulare Absorptionsbanden.

Mit seinem 2,7-Meter-Teleskop in einer Boeing 747SP ist SOFIA im Vergleich zu seinen Vorgängern – dem Learjet Observatory, das 1965 in Betrieb ging, und dem Kuiper Airborne Observatory, das 1975 folgte – wahrhaftig ein Riese.

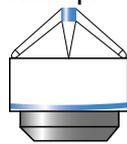
KAO, auf dem auch deutsche Wissenschaftler als Gäste mitflogen, wurde zu einem großen wissenschaftlichen Erfolg. Dies ließ damals bei der NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) den Plan reifen, gemeinsam ein noch größeres Observatorium zu bauen – eben SOFIA.

Das KAO-Teleskop war sehr verschachtelt in seinem Flugzeug untergebracht und daher schwer zu fotografieren. Schauen wir uns deshalb eine Schnittzeichnung und ein Modell an (siehe Bild auf der rechten Seite oben). Die Zeichnung zeigt den offenen Flugzeugschacht, in dem der Teleskoptubus mit den drei Spiegeln seiner Nasmyth-Optik (Primär-, Sekundär- und Tertiärspiegel) untergebracht ist. Der Luftstrom über der Schachtoffnung wird durch eine in der Zeichnung erkennbare kissenartige Abweiskonstruktion nach außen abgelenkt. Das Teleskop ist in der vorderen Flugzeugwand zur mechanischen Abkopplung vom Flugzeug in einem kugelförmigen »Luftlager« aufgehängt: Es schwimmt, in drei Achsen beweglich, über einem Spalt, durch den komprimierte Luft strömt. Das SOFIA-Teleskop ist ähnlich gelagert, aber in diesem Fall strömt Öl durch den Spalt – wir werden darauf später zurückkommen. Die wissenschaftlichen Messgeräte des KAO sind in dem tonnenförmigen Behälter rechts in der Zeichnung im Nasmyth-Fokus untergebracht. Die Kabine ist thermisch isoliert und klimatisiert, weil sich hier die Astronomen aufhalten, während die Teleskopoptik der kalten, freien Atmosphäre in großer Höhe ausgesetzt ist.

SOFIA: Boeing 747SP

Kuiper Airborne Observatory (KAO): Lockheed C-141A

Teleskope



SOFIA



Mensch



KAO



Learjet

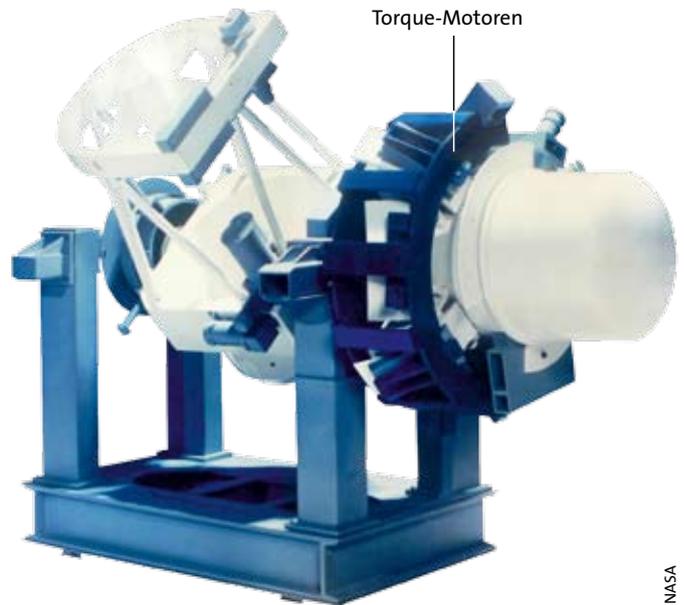
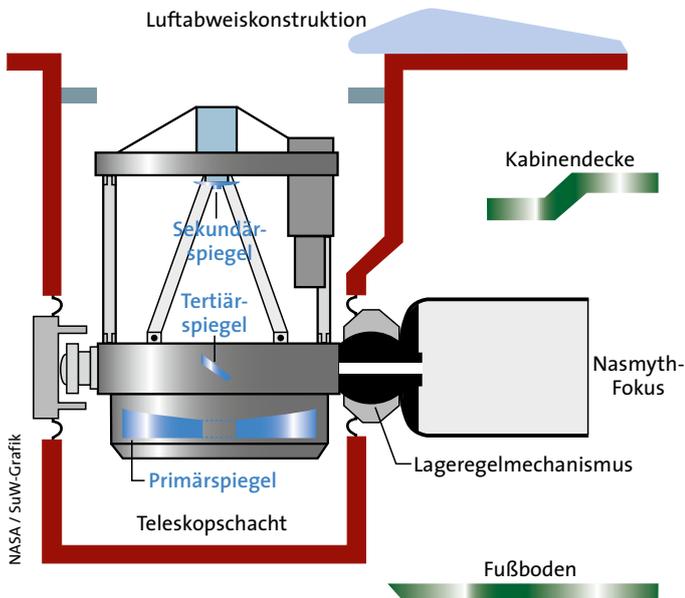
Learjet Observatory:
Learjet 24

An dem Modell des KAO-Teleskops lassen sich weitere Einzelheiten erkennen. Auffällig ist der blaue Rahmen, der das weiße Teleskop trägt. Die an dem Rahmen erkennbaren Konsolen sind die Auflagerpunkte für die Federbeine, mit denen der Rahmen im Flugzeug befestigt ist – den Federbeinen eines Autos entsprechend dienen sie der translatorischen Schwingungsisolierung des Teleskops. Die rechts sichtbaren blauen und weißen Konsolen, die ringförmig die Tonne für die wissenschaftlichen Instrumente umgeben, enthalten die segmentierten Torque-Motoren zur Feinjustierung des Teleskops, auf die wir weiter unten eingehen werden.

Wie können wir nun ein noch größeres, ja möglichst großes Teleskop in einer Boe-

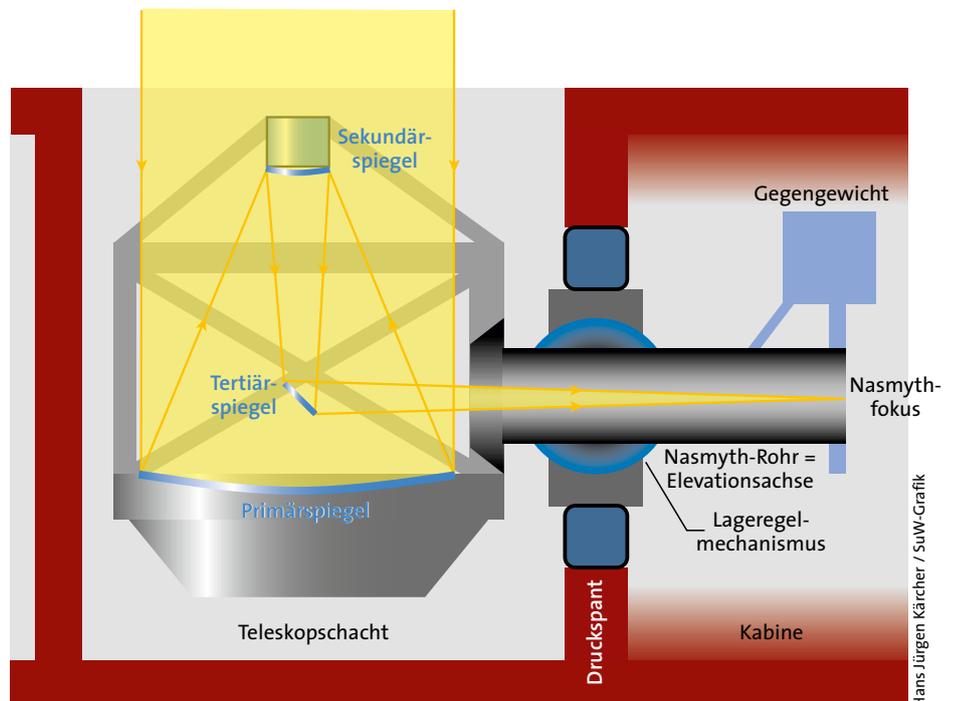
ing 747 unterbringen? Deren Rumpf hat einen Durchmesser von etwa acht Metern, und die Kollegen der NASA gaben uns alle Freiheiten, in seine Außenhaut ein großes Loch zu schneiden, um durch dieses hinauszuschauen.

Zunächst überlegen wir uns noch einmal die optische Anordnung (siehe Bild auf der rechten Seite, Mitte). Es gibt kaum Alternativen zu der beim KAO gewählten Nasmyth-Optik. Die Brennweite des Primärspiegels wählen wir möglichst kurz (Öffnungsverhältnis $f/D \approx 1$), damit der Tubus kurz und kompakt wird; die Elevationsachse legen wir in die Mitte zwischen Primär- und Sekundärspiegel: So lässt sich der Tubus im Rumpf des Flugzeugs um diese Achse drehen, ohne an die Wände

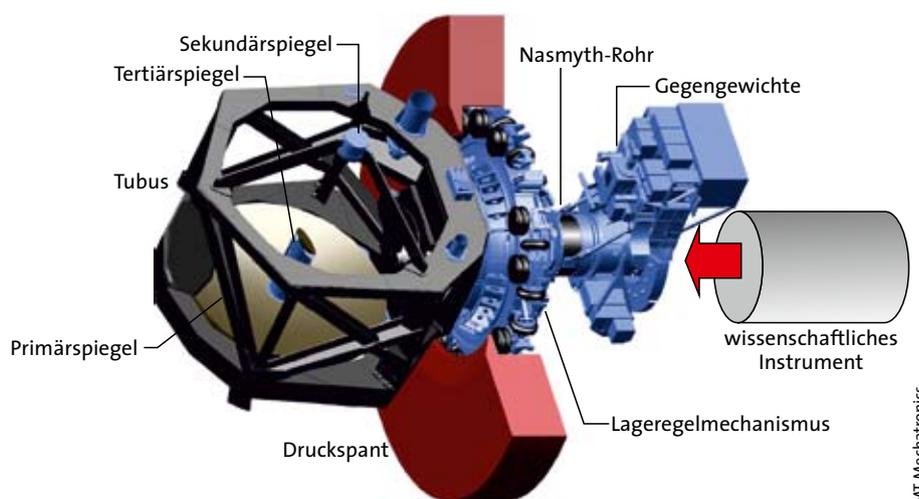


Das Teleskop des Kuiper Airborne Observatory ist SOFIAs unmittelbarer Vorläufer. Wie es im Flugzeugschacht untergebracht wurde, zeigen eine Schnittzeichnung (links) und ein Modell.

Wie schon das KAO, besitzt SOFIA eine Nasmyth-Optik. Aber anders als bei seinem Vorgänger wird das Teleskop nicht von einem massiven Rahmen (blau im Bild oben rechts), sondern direkt von der auch als Druckspant bezeichneten Trennwand zwischen Schacht und Kabine getragen.



des Schachts anzustoßen. Auf eine Azimutachse verzichten wir ganz, indem wir dem Piloten den Auftrag geben, immer so zu fliegen, dass seine Flugroute die Azimutachse ersetzt. Das ist tatsächlich mit hinreichender Genauigkeit möglich, soll aber hier nicht weiter erörtert werden. Wir verzichten auch auf den blauen Rahmen des KAO-Teleskops, denn er würde Platz benötigen und Gewicht kosten, und wir wollen ja möglichst groß und leicht bauen. Deshalb lagern wir das Teleskop direkt in dem Druckspant des Flugzeugs, der den Schacht von der Kabine trennt. Und schon steht unser Teleskopkonzept! (In Wahrheit durchlief der Entwurfsprozess in den Jahren von 1987 bis 1997 einige evolutionäre Schleifen, siehe Kasten auf S. 46)



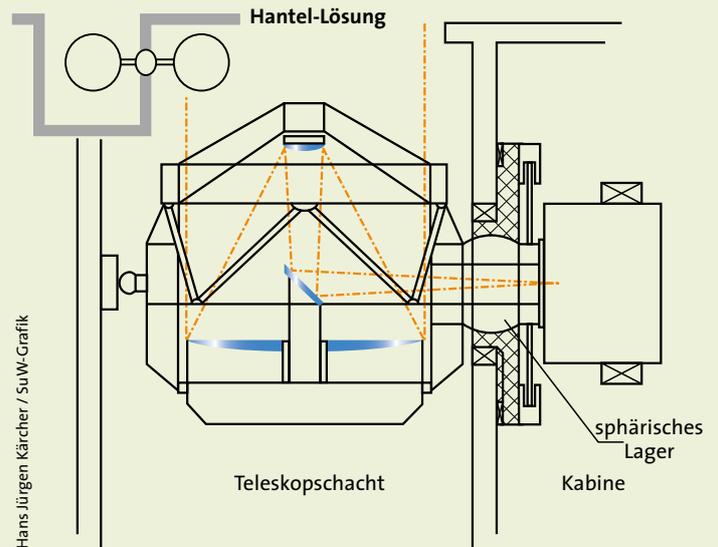
Der Tubus und die Optik des SOFIA-Teleskops sind links im Schacht untergebracht, die Messinstrumente und Gegengewichte rechts in der Kabine.

Die Entwicklung des SOFIA-Teleskops

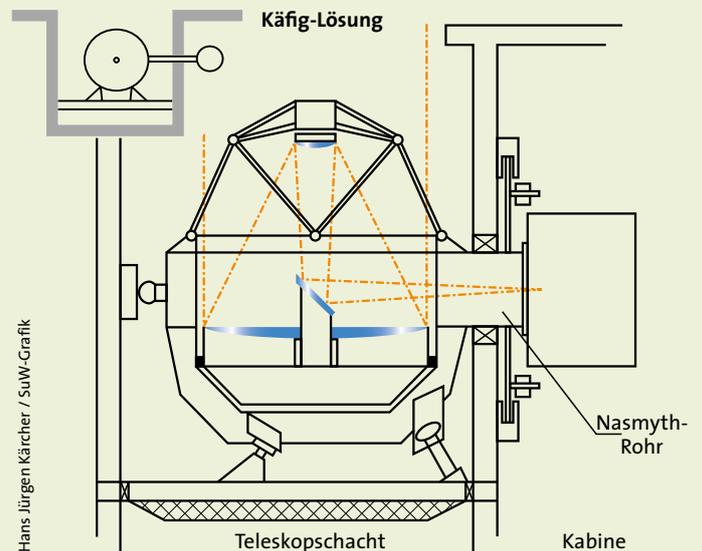
Die Entwicklung des SOFIA-Teleskops dauerte mehr als zehn Jahre. Im Jahr 1986 suchten die Ingenieure der Projektgruppe bei MAN Technologie im Auftrag der damaligen Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) nach Alternativen zur von der NASA für das KAO entwickelten »Hantel-Lösung«. Die nebenstehenden Zeichnungen zeigen oben die »Hantel« und unten, als Alternative, den »Käfig«. Rechts daneben sind diese Lösungen jeweils im Modell zu sehen. In beiden Fällen befindet sich auf der einen Seite der Schachtwand die Teleskopoptik, auf der anderen Seite das wissenschaftliche Instrument (und gegebenenfalls Ballast zum Erhalt des Gleichgewichts). Die beiden Komponenten sind durch das »Nasmyth-Rohr« miteinander verbunden. Bei der Hantel wird das Ganze in der Mitte durch den Druckspant des Flugzeugs gestützt.

Aus strukturmechanischer Sicht hat die Hantel-Lösung schwerwiegende Nachteile: Sie erfordert ein möglichst steifes, in der Mitte von einem sphärischen Lager gestütztes Nasmyth-Rohr, das die beiden schweren Teile miteinander verbindet und trägt, und dabei auch den in der Kabine und im Schacht stark unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt ist. Zudem ist auf der Kabinenseite Ballast erforderlich, um das Gleichgewicht um das Lager zu halten, denn die Optik des Teleskops wiegt deutlich mehr als die wissenschaftlichen Instrumente. Das Nasmyth-Rohr biegt sich unweigerlich durch – das muss die Optik verkraften.

Aus diesen Gründen wäre es vorteilhaft, von der Hantel-Lösung loszukommen und eine in sich ausgewogenere Variante zu finden, die keinen Ballast benötigt. Dies leistet der »Käfig«, bei dem das sphärische Lager in einzelne Segmente aufgelöst ist; dabei wird das Gewicht des Teleskops vom Boden aufgenommen (man kann es am besten an dem Modell erkennen). Das Ganze ist so angeordnet, dass alles im Gleichgewicht ist. Bei dieser Lösung muss das Nasmyth-Rohr nur das wesentlich leichtere wissenschaftliche Instrument tragen, und wir sparen insgesamt 30 Prozent Gewicht. Allerdings müssen wir etwas zusätzliches Gewicht für den Käfig spendieren, der die Lagersegmente trägt.



Hans Jürgen Kärtcher / SuW-Grafik



Hans Jürgen Kärtcher / SuW-Grafik



Der 2,7 Meter große Primärspiegel mitsamt seiner Zelle wird ins Flugzeug eingebaut. Der Spiegel selbst mit seiner weißlichen Honigwabenstruktur ist von der Rückseite her zu erkennen, die rote Farbe kommt von der durchscheinenden Spiegelabdeckung, mit der seine Vorderseite beim Einbau gegen Beschädigungen geschützt ist.

Das Nasmyth-Rohr wurde aus einem thermisch inaktiven und extrem steifen Kohlefaser-Verbundwerkstoff hergestellt. Es trägt am einen Ende das kalte Teleskop und am anderen die temperierten Messinstrumente und Gegengewichte.



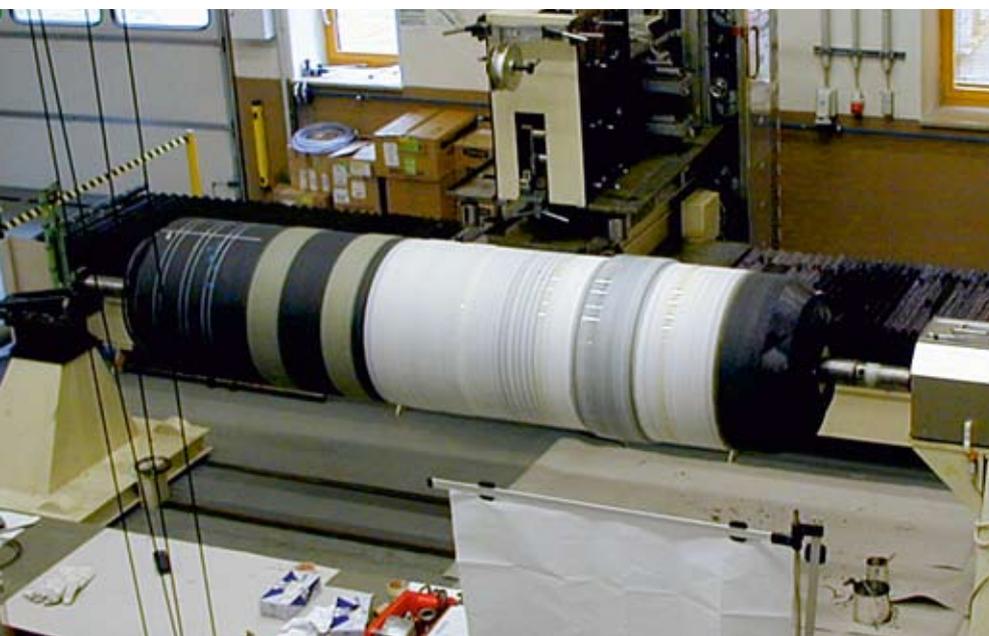
Hans Jürgen Kärcher

Hans Jürgen Kärcher

Die Käfig-Variante stieß bei den Experten der NASA zwar auf großes Interesse, aber schließlich setzte sich – trotz der geschilderten strukturmechanischen Nachteile – doch die Hantel durch, zum einen, weil die Schnittstellen zum Flugzeug beim Käfig komplizierter sind als bei der Hantel, zum andern vielleicht auch, weil den konservativ eingestellten NASA-Konstrukteuren die Käfig-Lösung zu revolutionär schien. Beim zukünftigen »Next Generation Airborne Telescope«, das in einem Airbus A380 untergebracht werden sollte, ließe sich im Käfig-Modus ein Acht-Meter-Spiegel im deutschen Rumpsegment des A380 unterbringen!

Insgesamt wurden im Lauf des Entwurfsprozesses mehr als hundert Varianten und Varianten von Varianten untersucht, bis sich 1996/97 der endgültige, schließlich realisierte Entwurf herauskristallisierte.

Für die Aufhängung des Teleskops im Flugzeug wurden zwei Varianten entwickelt und diskutiert: Sie sind links in den Zeichnungen, rechts als Modelle zu sehen. Oben die »Hantel«: Hier stützt ein in der Trennwand zur Kabine ruhendes sphärisches Lager das gesamte Gerät, und es sind Gegengewichte erforderlich. Unten der »Käfig«: Er ruht auf kufenartigen Segmenten, und es wird kein Gegengewicht benötigt.



MT Mechatronics

Die Hauptbaugruppen des Teleskops

Nun wollen wir uns mit den Einzelheiten der Teleskopmechanik beschäftigen. In der dreidimensionalen Darstellung des Teleskops auf S. 45 unten sind die wichtigsten Baugruppen zu erkennen. Der rote Druckspant trennt die Kabine vom Schacht und trägt in einem kreisförmigen Loch das Teleskop und die Messinstrumente. Die Optik besteht aus dem Primärspiegel, der die Strahlung aus dem Weltall einfängt, aus dem Sekundärspiegel, der sie fokussiert, und aus dem Tertiärspiegel, der sie durch das Nasmyth-Rohr zur Bildebene im wissenschaftlichen Instrument schickt. Der »Tubus«, der seinen Namen von den alten rohrförmigen Teleskopen hat, besteht aus einem offenen Tragwerk aus Kohlefaserstäben.

In der Kabine lässt sich für jeden neuen Flug, je nach vorgesehenem Beobachtungsprogramm, ein anderes wissenschaftliches Instrument anflanschen. Dessen Gewicht wird über die Gegengewichte ausbalanciert. In der Mitte befindet sich der Lageregelmechanismus, den wir im Folgenden näher erläutern wollen: Er besteht aus dem translatorischen und dem rotatorischen Schwingungsisoliersystem. Zwischen den Gegengewichten und dem Lageregelmechanismus lässt sich ein kurzes Stück des schwarzen Nasmyth-Rohrs erkennen, das sozusagen das Rückgrat des gesamten Teleskops bildet.

Optische und mechanische Struktur des Teleskops

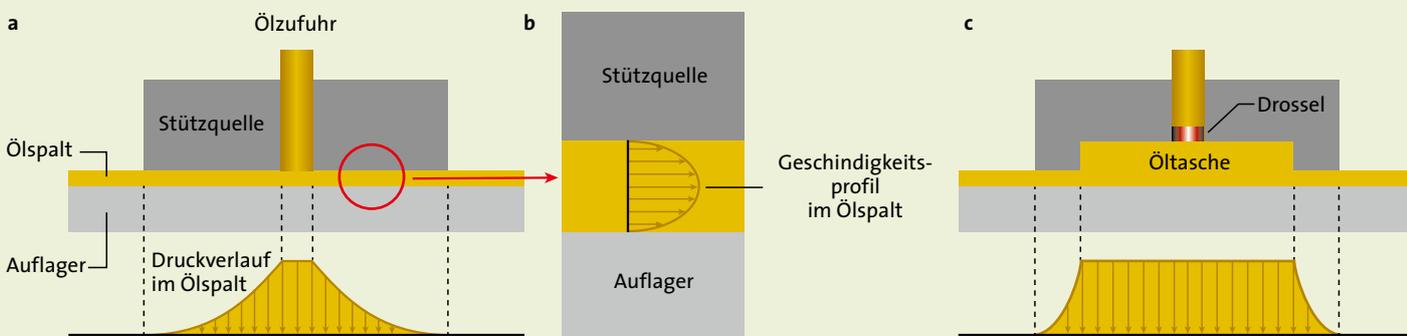
Die Optik soll nicht der Schwerpunkt dieses Artikels sein. Dennoch folgen hier ein paar Bemerkungen zu den optischen Komponenten und zur Teleskopstruktur. Die größte und teuerste Komponente ist der 2,7 Meter große Primärspiegel in seiner Zelle (siehe Bild auf der linken Seite). Der Spiegel besteht aus der temperaturstabilen Glaskeramik Zerodur. Er wurde in einem 3,5 Tonnen schweren Stück bei Schott in Mainz gegossen, und dann bei REOSC in Frankreich durch Ausfräsen der Wabenstruktur auf etwa 800 Kilogramm »leichtgewichtet« und poliert. Er wird vor jedem Flug auf die in Flughöhe herrschende Temperatur von –30 Grad Celsius abgekühlt; das geschieht durch eine mit flüssigem Stickstoff betriebene Klimaanlage im Flugzeugschacht. Die Spiegelzelle selbst besteht aus Gründen des Leichtbaus und der Temperaturstabilität

Wie funktioniert ein hydrostatisches Öllager?

Wenn man zwischen zwei aufeinanderliegende Metallteile durch eine Bohrung mit hohem Druck Öl presst, löst sich das obere Teil vom unteren und schwimmt auf einem Ölfilm; in dem so entstandenen Spalt fließt das Öl auf Grund seiner Zähigkeit in laminarer Strömung von der zentralen Ölquelle zum Rand, wo sich der Öldruck dem umgebenden Luftdruck anpasst (Bilder a und b). Der Druckverlauf im Spalt nimmt von der Ölquelle aus nach außen hin sehr rasch ab; das Integral über den Druck ergibt die abhebende Kraft, die Mechaniker nennen deshalb das Oberteil dieses Lagers »Stützquelle«. Der Druck und die Dicke des Ölspalts hängen von der Zähigkeit des Öls ab. Wenn das Öl dünnflüssig ist, fließt es schnell ab, es baut sich nur ein geringer Druck auf, und der Spalt wird dünner. Zwischen Öldruck, Fließgeschwindigkeit und Spaltdicke stellt sich ein Gleichgewicht ein. Bei üblichen hydrostatischen Öllagern werden Drücke zwischen 50 und 100 bar verwendet, die Spaltdicke beträgt typischerweise 50 bis 100 Mikrometer.

Der rasche Abfall des Öldrucks außerhalb der Ölzufuhr beschränkt die Tragfähigkeit des Öllagers. Man kann sie um einiges steigern, indem man unterhalb der Ölzufuhr eine Tasche anordnet (Bild c). Dadurch trägt eine größere Fläche mit dem maximalen Druck aus der Ölzuleitung, und der Druckabfall beschränkt sich auf den Randbereich der Stützquelle. In diesem Fall muss man aber in der Ölzufuhr noch eine Drossel anordnen, um die Stützquelle von der Zufuhr hydraulisch zu entkoppeln. Anderenfalls würde die Nachgiebigkeit des Öls in der Tasche über die Nachgiebigkeit der Zuleitungen unkontrolliert zunehmen.

Öllager haben große mechanische Vorteile: Sie sind sehr steif und nur mit viskoser Reibung behaftet. Der große praktische Nachteil: Sie sind mit »Ölpantschen« verbunden, mit den entsprechenden Konsequenzen bei Betrieb und Wartung. Ein Luftlager wäre da viel angenehmer, denn Luft belastet nicht die Umwelt. Der Nachteil des Luftlagers ist die viel geringere Zähigkeit und die viel höhere Kompressibilität der Luft. Um das Problem mit der



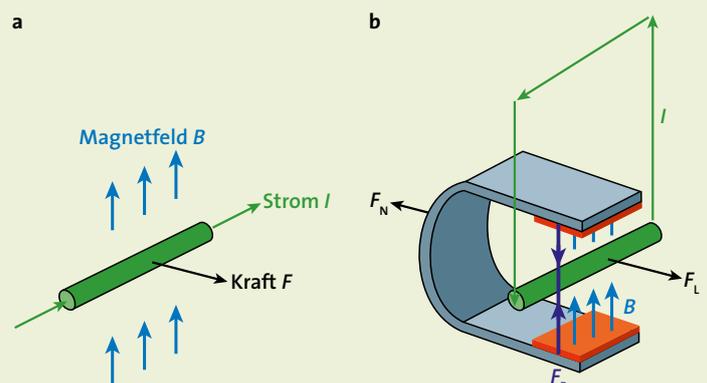
Torque-Motoren

Die Grundlage jedes Elektromotors ist das von Michael Faraday entdeckte Induktionsgesetz. Es wird in Physikbüchern meist mit der Figur in Bild a erläutert – dabei ist das Magnetfeld B durch die blauen Pfeile angedeutet, der Strom I fließt durch den grünen Leiter, und die induzierte Kraft F nennt sich Lorentz-Kraft. Ob nun erst der Strom fließt und dadurch die Kraft erzeugt (Motor) oder erst die Kraft den Leiter bewegt und dadurch den Strom induziert (Generator), ist dabei zunächst offen, ebenso die Frage, wie die Kräfte aufgebracht werden oder wohin sie laufen – nach Newton muss es ja zu jeder Kraft eine Gegenkraft geben.

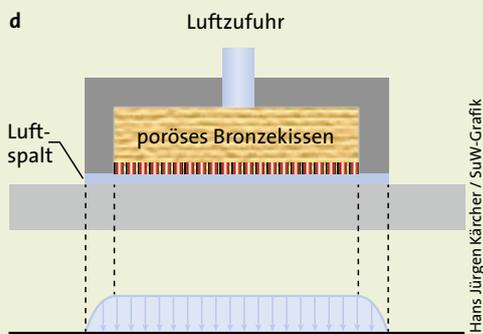
Aus mechanischer Sicht gibt das »Schaukel-Experiment« mehr Aufschluss (Bild b). Es deutet an, dass der Stromkreis I sich in der Schaukel, und der magnetische Fluss B in einem Magnetschuh schließen muss. Die Lorentz-Kraft F_L erzeugt eine Gegenkraft F_N , die sich über das Magnetfeld in den Magnetschuh überträgt, der daher irgendwo aufgelagert sein muss. Das Magnetfeld erzeugt aber auch eine Anziehungskraft F_B , die mit der Lorentz-Kraft nicht verwechselt werden darf – in unserem Bild wird sie mechanisch über die Biegung im Magnetschuh abgetragen. Wie im Schaukel-Experiment funktionieren auch die üblichen Elektromotoren: Dreht man den Leiter um 90 Grad und schließt den Stromkreis innerhalb des Magneten, so entstehen zwei entgegengesetzte

Lorentz-Kräfte, die dann den Rotor drehen. So hat Werner von Siemens seine ersten Elektromotoren und Generatoren gebaut.

Nun zu unseren Torque-Motoren (auch Regel- oder Drehmomentmotoren genannt). Es sind eigentlich »Linear-Motoren«, die – wie der Name sagt – keine großräumige Drehbewegung, sondern eine Linearbewegung erzeugen sollen. Bei SOFIA sind die Motoren in diesem Sinn sphärisch gekrümmte Linearmotoren, sie erzeugen nur kurze Bewegungen im Bereich von ± 3 Grad. Bei den Linearmotoren verläuft die innere Lastabtragung anders



Nachgiebigkeit der Luft in den Taschen zu minimieren, wurden Luftlager aus poröser Bronze erfunden, bei denen die Poren der Bronze als »Mikro-Drosseln« funktionieren – somit ergibt sich unter der gesamten Stützquelle ein gleichmäßig verteilter Lagerdruck (Bild d). Allerdings liegen die handhabbaren Luftdrücke nur bei fünf bis zehn bar und sind damit viel kleiner als beim Öllager. Auch der sich einstellende Luftspalt ist mit fünf bis zehn Mikrometern viel kleiner als beim Öllager. Dies stellt für die Anwendung im Großen eine unüberwindliche Grenze dar. Aus diesem Grund wurde bei SOFIA – im Gegensatz zum KAO – auf ein Öllager zurückgegriffen.



aus Kohlefaser-Verbundwerkstoff – sie ist den niedrigen Temperaturen im Flugzeugschacht ausgesetzt. Zwischen den sternförmigen Armen der Spiegelzelle befindet sich das Hebelsystem, mit dem der Spiegel auf seiner Rückseite isostatisch aufgelagert ist (das heißt, die Last ist auf jedem Stützpunkt die gleiche).

Auch der Tubus ist aus Kohlefaser gefertigt. An seiner Spitze trägt er den Sekundärspiegel, der aus leichtem Siliziumkarbid hergestellt ist. Der Sekundärspiegel lässt sich über einen komplizierten Mechanismus relativ zum Primärspiegel genau ausrichten und während der Beobachtungen auch schnell zwischen zwei Positionen am Himmel hin- und herbewegen oder »wobbeln«.

Das imposanteste Strukturteil des Teleskops ist das Nasmyth-Rohr (siehe Bild auf S. 47). Es ist am fertig montierten Teleskop kaum zu sehen. Von allen Komponenten hat es am meisten unter den Umweltbedingungen im Flugzeug zu leiden: Am einen Ende ist es der Zimmertemperatur in der Kabine ausgesetzt, am anderen Ende muss es den tiefen Temperaturen des Flugzeugschachts standhalten. Auch das Nasmyth-Rohr besteht aus Kohlefaser-Verbundwerkstoff, weil die Kohlefasern in ihrer Längsrichtung einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben:

Mischt man sie im richtigen Verhältnis mit dem Harz, das sie zusammenhält, so lässt sich in der Summe ein Wärmeausdehnungskoeffizient im Bereich von einigen Prozent dessen von Stahl erreichen. Deshalb wurde das Nasmyth-Rohr bei MAN Technologie in Augsburg sehr sorgfältig gewickelt – eine hochgenaue, hauptsächlich im Flugzeugbau verwendete Methode.

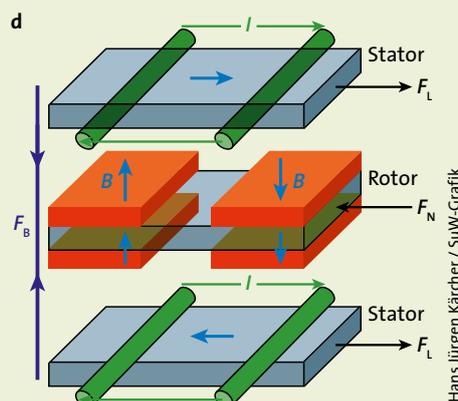
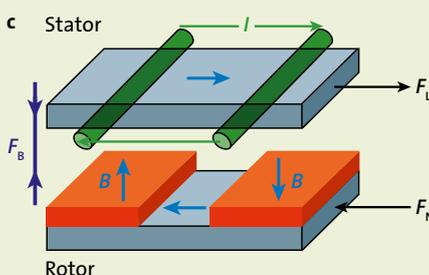
Das Nasmyth-Rohr sah zunächst wie ein riesiger, langgestreckter Behälter aus: Erst nach Abschluss des Wickelvorgangs wurden die Enden des Behälters abgeschnitten, und es entstand die endgültige Rohrform. Das Rohr ist mit seinen 30 Millimetern Wandstärke und 700 Kilogramm Gewicht das schwerste jemals bei MAN Technologie in Augsburg aus Kohlefaser hergestellte Bauteil.

Montage und Inbetriebnahme

Die gesamte hier beschriebene Teleskopmechanik wurde in den Jahren 2001 und 2002 bei MAN Technologie in Augsburg zusammengebaut und anschließend mechanisch und regelungstechnisch ausgetestet. Danach wurde das Teleskop wieder in drei Teile zerlegt (Primärspiegeleinheit, Tubus und Lageregelmechanismus) und mit einem Transportflugzeug der Firma

als bei üblichen schnell drehenden Elektromotoren, und die wollen wir uns hier überlegen. Bild c zeigt das Prinzip eines »einfach-wirkenden« Linear motors. Das Magnetfeld wird durch die Permanentmagneten B erzeugt und über das Stator- und das Rotoreisen kurzgeschlossen. Man könnte sich noch aussuchen, ob die Magneten auf dem Stator oder auf dem Rotor befestigt werden, aber es bietet sich an, die Permanentmagneten auf der Rotorseite zu befestigen, da sie keine Verkabelung benötigen und der Motor somit »bürstenlos« arbeitet. Auf dem Stator ordnen wir

die Stromleiter an, die Lorentz-Kraft entsteht in den Windungen, und die Reaktionskraft, die den Rotor antreibt, wird durch das Magnetfeld auf diesen übertragen. Die magnetische Anziehungskraft F_B muss von dem nicht dargestellten Motorlager aufgenommen werden. Günstiger ist der »doppelt wirkende« Motor (Bild d): Hier wird die magnetische Anziehungskraft nicht über das Lager, sondern über das (nicht dargestellte) Statorjoch abgetragen; auf das Motorlager werden – wie gewollt – nur die Reaktionskräfte der Lorentz-Kraft übertragen. So ist der SOFIA-Motor aufgebaut.



Das Lageregelssystem des SOFIA-Teleskops

Herzstück des SOFIA-Teleskops ist das inertielle Lageregelssystem. Seine Aufgabe besteht in der völligen mechanischen Entkopplung des Teleskops vom Flugzeug, um es unabhängig von dessen Bewegungen den astronomischen Quellen mit hoher Präzision nachführen zu können. Das Lageregelssystem besteht aus einem kugelförmigen hydrostatischen Öllager und einem darum herumgebauten, ebenfalls kugelförmigen, direkt wirkenden Torque-Motor, die wiederum in einem Schwingungsisoliersystem ruhen (siehe Kasten »Torque-Motoren« auf S. 48).

In Bild 1 sieht man die Kugel des Lagers beim Einbau in ihre Lagerschale, in Bild 2 ist diese Kugel zu Testzwecken mit dem Nasmyth-Rohr zusammengebaut. Hier kann man oben und unten auf der Kugel die beiden breiten Ringe erkennen, auf denen im fertigen Zustand der Ölfilm erzeugt wird, der das Teleskop schließlich trägt. Da der Ölfilm nur etwa 50 Mikrometer dick ist, muss die Oberfläche dieser Ringe entsprechend genau gearbeitet sein – deshalb besteht sie aus einem speziellen Gusseisen, das sich sehr gut schleifen lässt. Innen ist die Kugel mit Rippen ausgesteift, die in Bild 3 zu erkennen sind. Die Kugel hat einen Durchmesser von 1,2 Metern, und die Ringe für den Ölfilm sind gerade so groß, dass sie sich gegenüber ihrem Gegenstück in allen drei Achsen um bis zu ± 3 Grad bewegen können – so groß sind maximal die feinen Ausgleichsbewegungen, die zur Lagekorrektur des Teleskops in Elevation und in Azimut erforderlich sind. Die Bewegungen im Großen werden über eine separate Elevationsachse außerhalb des Rotationsmechanismus und in Azimut durch den Piloten über die Steuerung der Flugbahn ausgeführt.

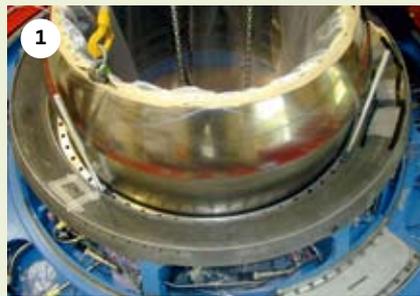
Bild 3 zeigt den Aufbau, in dem das erste Mal die Funktion des Lagers getestet wurde, wobei die Lagerkugel alleine im Öl schwimmt (das Nasmyth-Rohr ist noch nicht eingebaut). Die Testingenieure bewundern fasziniert das *first oil* (im Anklang an das *first light*, das die Astronomen bei der optischen Inbetriebnahme eines Teleskops feiern): Die ersten Öltröpfchen treten durch den Lagerspalt nach außen. Im Innern der Lagerkugel sind deren verstärkende Rippen zu sehen. Bild 4 zeigt das Nasmyth-Rohr vor dem endgültigen Ein-

fädeln in die Lagerkugel. Die metallischen Flansche (aus Invar) sind mit der Kohlefaserverwand des Nasmyth-Rohrs verklebt und zusätzlich verschraubt, sie werden schließlich mit der Lagerkugel verbunden. Am oberen Ende (dem kalten Ende im Flugzeugschacht) ist unter der roten Montagevorrichtung die Befestigungsstruktur für den Teleskoptubus zu erkennen; bei der hier sichtbaren ringförmigen Metallstruktur, aus der lappenartige Konstruktionsteile herausragen, handelt es sich um die Rotoren der Torque-Motoren mit den darauf befestigten Permanentmagneten, welche die Korrekturbewegungen des Teleskops während des Flugs bewirken.

Bild 5 zeigt den Stator des Kugelmotors mit teilweise montierten Windungselementen. Einer der Rotormagneten mit dem zugehörigen Spulenpaket des »Stators« lässt sich in Bild 6 besser erkennen. Später

wird sich auf dieser Seite das gegenständige Wicklungselement des »doppelt wirkenden« Motors befinden. Rotor und Stator sind durch einen wenige Millimeter großen Luftspalt getrennt – hier werden die magnetischen Kräfte erzeugt, die zur präzisen und stabilen Ausrichtung des Teleskops dienen. Die Motoren bestehen aus jeweils vier gegenüberliegenden Segmenten in allen drei Achsen, also aus insgesamt zwölf Motorsegmenten, die – wie bereits oben erwähnt – auf maximale Stellwege von ± 3 Grad ausgelegt sind.

Bild 7 zeigt die fertig montierte Lagereinheit beim Einfädeln in das Schwingungsisoliersystem. Oben ist unter der roten Montagevorrichtung die Befestigungsstruktur für den Tubus zu sehen. Unten erkennt man ein Stück des schwarzen Nasmyth-Rohrs und den metallischen Flansch, an den später das wissenschaft-



Alle Bilder auf dieser Doppelseite: MT Mechatronics

liche Instrument und die Gegengewichte angeschraubt werden.

Die Bilder 8 und 9 zeigen das fertig vormontierte Teleskop in der Montagehalle bei MAN Technologie in Augsburg, links von der Kabinenseite und rechts von der Schachtseite aus betrachtet. Der rote äußere Ring entspricht dem Druckspant des Flugzeugs, der alles zusammenhält (siehe das Bild auf S. 45 unten). Innerhalb dieses Rings sind die Federelemente des Schwingungsisoliersystems sichtbar: Sie bestehen aus pneumatischen Gummibälgen – Luftfedern, wie sie im Lkw-Bau verwendet werden (als schwarze *donuts* zu erkennen). Man kann tangential und axiale Luftbälge unterscheiden. Die tangentialen nehmen die 17 Tonnen Eigengewicht des Teleskops auf; die axialen nehmen die durch den Druckunterschied zwischen Kabine und Schacht entstehende Längskraft

auf – sie ist nahezu gleich groß wie das Eigengewicht. Der Druck in den Luftfedern wird so geregelt, dass das Teleskop gegenüber dem Druckspant des Flugzeugs genau in Mittellage ist. In den Innenflansch des Schwingungsisoliersystems wird dann die »grobe« Elevationsachse mit ihrem Antrieb montiert, und dahinein kommt schließlich das rotatorische System mit sphärischem Lager und Motoren. An den Flansch mit dem gelben Inneren werden später die wissenschaftlichen Instrumente angeschraubt, und an die blaue Platte die Elektronikboxen. Auf der löchrigen Struktur vor dem Lageregelmechanismus werden die Kabel zur Versorgung der Antriebe und des Instruments geführt.

Bild 9 zeigt die graue Tubusstruktur des Teleskops und das Innere des Nasmyth-Rohrs, durch das die Photonen zum wissenschaftlichen Instrument gelangen.

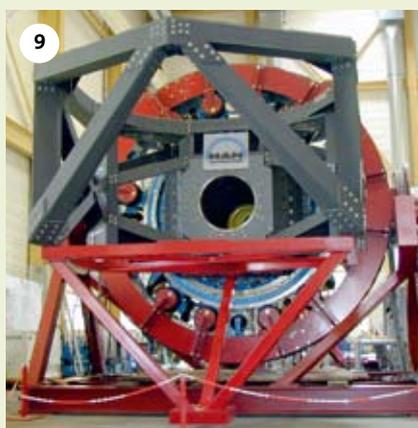
Airbus – einem Airbus Beluga, mit dem sonst Flugzeugteile zur Montage zwischen Toulouse und Hamburg hin- und hertransportiert werden – zum Einbau ins Flugzeug nach Waco im US-Bundesstaat Texas geflogen. Aus Gründen, die viel mit Managementproblemen in Waco, weniger mit technischen Problemen der SOFIA-Ingenieure zu tun hatten, zog sich die Inbetriebnahme von 2002 bis 2009 hin. Im Jahr 2009 wurde schließlich das fertig zusammengebaute Flugzeubobservatorium zu seinem endgültigen Heimathafen nach Palmdale, Kalifornien, überführt. Dort wurde zunächst – bei am Boden stehendem Flugzeug – das gesamte Teleskopsystem einschließlich Optik und Testinstrument durch Beobachtung des Polarsterns (wegen der am Boden fehlenden Azimut-Achse) ausgetestet.

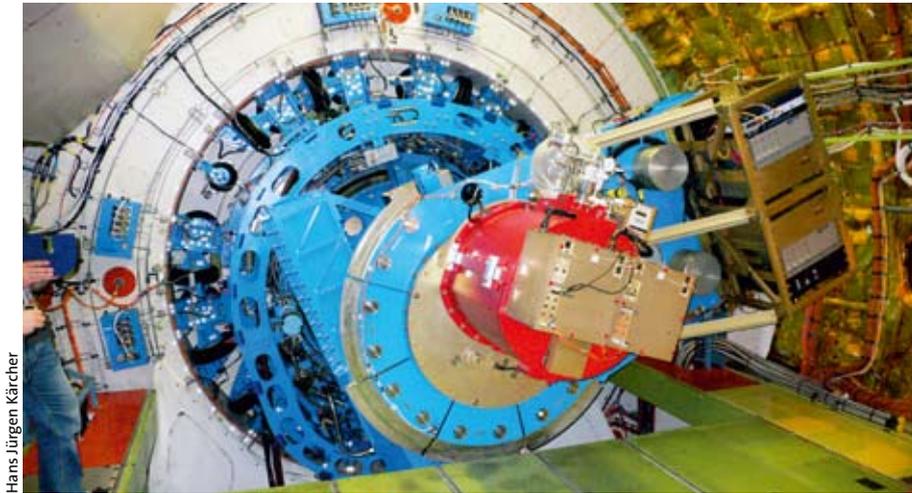
Inzwischen hat das Deutsche SOFIA Institut (DSI), das am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart beheimatet ist, in Palmdale eine Inbetriebnahme- und Wartungsmannschaft etabliert und mit den Kollegen der NASA viele Inbetriebnahme- und erste Wissenschaftsflüge durchgeführt. Das große Bild auf S. 43 zeigt den ersten Flug bei Tag, bei dem das Tor des Teleskopschachts geöffnet wurde. Man erkennt das Dreibein, das den Sekundärspiegel trägt, und den zum Schutz vor Sonneneinstrahlung abgedeckten Primärspiegel.

Erste Ergebnisse

Die ersten wissenschaftlichen Flüge wurden mit der an der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) entwickelten *Faint Object InfraRed Camera for the SOFIA Telescope* (FORCAST) durchgeführt. Das Bild auf S. 52 oben zeigt FORCAST in der Flugzeugkabine, an den Halteflansch des Teleskops montiert. Die rote Tonne ist das Dewar-Gefäß, in dem die empfindlichen Infrarot-CCDs mit flüssigem Helium auf Temperaturen bis fast auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt werden.

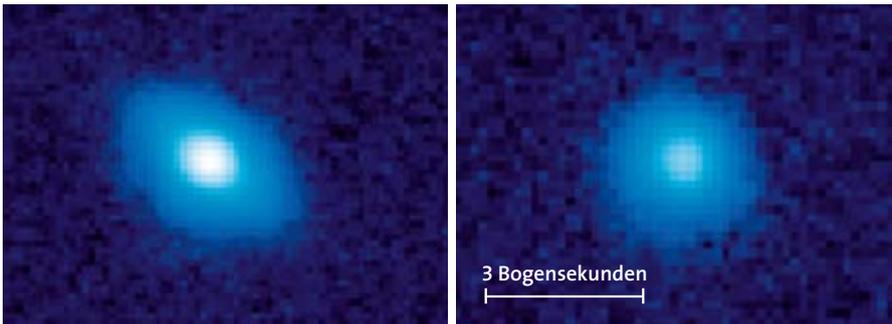
Die beiden Bilder darunter sind erste, zu Testzwecken durchgeführte Aufnahmen des Infrarot-Sterns OH 231, der bei 20 bis 40 Mikrometer Wellenlänge besonders hell leuchtet. Auf der rechten Aufnahme ist das Bild des Sterns rund und besitzt einen Durchmesser von etwa drei Bogen Sekunden: Es ist »beugungsbegrenzt«, das heißt, die Schärfe der Abbildung ist allein durch das Beugungsverhalten der





Hans Jürgen Kärcher

Als erstes Instrument kam FORCAST, eine von der Cornell University in Ithaca entwickelte Infrarotkamera mit SOFIA zum Einsatz. Die Kamera befindet sich im roten Dewar-Gefäß – einem verspiegelten, doppelwandigen, evakuierten Behälter aus Edelstahl, welcher der thermischen Isolierung dient.



NASA / FORCAST

Der Infrarotstern OH 231, der im Wellenlängenbereich von 20 bis 40 Mikrometer besonders hell leuchtet, wurde zu Testzwecken mit FORCAST aufgenommen – vor der Beseitigung eines technischen Fehlers im Öllager des Teleskops (links) und danach.



NASA / FORCAST

Eine der ersten mit SOFIA gelungenen Aufnahmen: Jupiter mit drei seiner vier Galileischen Monde ist ein Farbkomposit dreier Infrarotaufnahmen bei Wellenlängen von 5,4 (blau), 24 (grün) und 37 Mikrometern (rot).

Teleskopoptik bei dieser Wellenlänge begrenzt. Im linken Bild ist das Beugungsscheibchen zu einer Ellipse verzerrt. Eine Analyse der Testdaten zeigte, dass dies keine Eigenschaft des beobachteten Objekts ist, und dass auch die Optik des Teleskops nicht dafür verantwortlich ist. Vielmehr war die Verzerrung um etwa zwei Bogensekunden durch (inzwischen behobene) Reibungseffekte einer falsch montierten Dichtung des Öllagers bedingt. Dieses Beispiel zeigt, wie empfindlich das komplexe System ist, und welchen technischen Herausforderungen sich SOFIA insgesamt stellen muss.

Das letzte Bild ist eine Infrarotaufnahme von Jupiter mit dreien seiner Galileischen Monde (Ganymed, Europa und Io), die bei einem der FORCAST-Flüge

entstand. Inzwischen ist das Flugzeug mit einem hochauflösenden Spektrometer für den Submillimeterwellen-Bereich bestückt, dem *German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies* (GREAT). Dieses Instrument wurde gemeinsam vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und von der Universität Köln entwickelt. Die ersten Wissenschaftsflüge mit GREAT stehen unmittelbar bevor.

In den nächsten Monaten steht die weitere Optimierung der Abläufe an, bis endlich der reguläre Betrieb des Observatoriums beginnen kann. Es ist auch beabsichtigt, das Flugzeugobservatorium nach Deutschland zu bringen, wo SOFIA der interessierten Öffentlichkeit, insbesondere Schülern, Lehrern und Studenten, vorgestellt werden soll.



HANS JÜRGEN KÄRCHER

war als Systemingenieur für Teleskope bei MAN Gustavsburg (jetzt MT Mechatronics) unter vielen anderen Projekten maßgeblich am Entwurf und Bau des großen Millimeterwellenteleskops GMT/LMT in Mexiko und des Flugzeugteleskops SOFIA beteiligt. Seit 2006 ist er für Forschungs- und Entwicklungsprogramme bei MT Mechatronics in Mainz zuständig.

Literaturhinweise

- Kärcher, H. J.: Das Teleskop und die Brücke. In: *Sterne und Weltraum* 11/2010, S. 44–55
- Kärcher, H. J.: Wie entwirft man ein Radioteleskop? In: *Sterne und Weltraum* 3/2011, S. 42–52
- Krabbe, A., Titz, R., Röser, H.-P.: SOFIA oder: Warum Astronomen in die Luft gehen. In: *Sterne und Weltraum* 12/1999, S. 1052–1063
- Lemke, D.: Ballon-Astronomie gestern und heute. In: *Sterne und Weltraum* 9/2010, S. 32–43

Weitere Literatur im Internet:
www.astronomie-heute.de/artikel/1017975



SkyQuest
XX14i
IntelliScope
Truss
Dobsonian
#9791

Dobsons von Orion: Echt Qualität zu hervorragend Preise



SkyQuest XT10i
IntelliScope #27184



SkyQuest XT10 Classic
Dobsonian #8947



SkyQuest XT10g GoTo
Dobsonian #8949



SkyQuest
XT8 Classic
Dobsonian
#8943



SkyQuest XX14g GoTo
Truss Tube Dobsonian
#8954



SkyQuest XT8i
IntelliScope #27183



SkyQuest XX12i Dobsonian,
Shroud & Case Set
#24757



SkyQuest XX12i
IntelliScope Truss
Dobsonian #9793



SkyQuest XT12g GoTo
Dobsonian #8952



SkyQuest XT6 Classic
Dobsonian #8942



SkyQuest XT8g GoTo
Dobsonian #8948

Orion has all the accessories to get the most out of your Dob.

Just add stars!



1.25" Shorty 2x
Barlow Lens
#8711



9.25" ID Full Aperture
Solar Filter
#7722



LaserMate Pro Laser
Collimation Kit
#5684



Scope Cloak for 12"-16"
Dobsonians #15207



46"x13.5"x18.5" Padded
Telescope Case
#15174



Dynamo Pro 12
Rechargeable Power
Station #2302

Autorisierte Orion Händler