

Dateiname: Umschlag_Version_16



Warum haben die NASA und das DLR – die amerikanische und deutsche Raumfahrtagentur – eine fliegende Sternwarte betrieben? Mit welchen Tricks haben Ingenieure und Ingenieurinnen das Teleskop des Stratosphären Observatoriums Für Infrarot Astronomie (SOFIA) stabilisiert? Was ist am infraroten Universum so interessant? Wozu hatte die Universität Stuttgart eine Außenstelle in Kalifornien? Welche Rolle spielte die deutsche Wiedervereinigung während der Entwicklungsphase? Diese und viele weitere Fragen rund um die fliegende Sternwarte SOFIA beantwortet dieses von Insidern geschriebene Buch in Bildern und Texten. Lassen Sie sich auf einen Forschungsflug an Bord des einzigartigen Observatoriums mitnehmen, gewinnen Sie einen Überblick über die wissenschaftlichen Errungenschaften des Observatoriums und fragen Sie: Wie könnte das nächste Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie aussehen? Was Sie schon immer über SOFIA wissen wollten, finden Sie in diesem Buch.

SOFIA Mission infrarotes Universum

SOFIA

Mission infrarotes Universum



Universität Stuttgart



Deutsches SOFIA Institut



Institut für Raumfahrtsysteme





Inhalt

- 1 **Einleitung (28)**
 - 1 Infrarotastronomie
 - 2 Beobachtungen im IR
 - 3 SOFIA – eine gemeinsame Idee der USA und Deutschlands
- 2 **Das Stratosphären Observatorium für Infrarot-Astronomie (100)**
 1. Eine Boeing 747SP – Umbau
 2. Anforderungen an das Teleskop
 3. Teleskopentwürfe
 4. Primärspiegel
 5. Sekundärspiegelmechanismus
 6. Teleskopoptik
 7. Lager und Antrieb
 8. Teleskopstruktur
 9. Teleskopsteuerung



Inhalt ff.

3 **Die wissenschaftlichen instrumente (51)**

1 GREAT

2 FIFI-LS

3 HAWC+

4 FORCAST

5 HIPO

6 FLITECAM

7 FPI+

8 EXES

4 **Der Betrieb des Flugzeugobservatoriums (105)**

1. Koordinatensysteme

2. Testbetrieb

3. Science Missions Operations

4. Die Bodenanlagen

5. Teleskopwartung

6. Software Entwicklung

7. Flugvorbereitung

8. Deployments

9. Eine Mission im Leben von SOFIA

10. Return to Flight mit Covid19

11. Der Spiegelausbau



Inhalt ff.

- 5 **Das Deutsche SOFIA Institut an der Universität Stuttgart (53)**
 - 1 Die Entwicklung des DSI
 - 2 Die Vergabe der Deutschen SOFIA Beobachtungszeit
 - 3 Die Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit
- 6 **SOFIAs wissenschaftliche Ergebnisse (53)**
 - 1 Wissenschaftliche Schwerpunkte der Instrumente
 - 2 Sonnensystem
 - 3 Galaktische Astrochemie
 - 4 Extragalaktische Interstellare Materie
 - 5 Galaktische Sternentstehung
 - 6 Extragalaktische Sternentstehung



Inhalt ff.

7 **Rückblick und Ausblick (17)**

1 SOFIA in a Nutshell

2 Bewertung von SOFIAs Wissenschaft

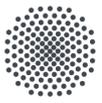
3 Zukunft der SOFIA Daten

4 Gegenwärtige und künftige Plattformen

5 Die Zukunft: “Back to the roots?”

8 **Lessons Learned (8)**

Anhang (50)



2.4 | Primärspiegel

Hans Kärcher

2.4.1 | Die Primärspiegelzelle

Die optischen Komponenten des Teleskops wurden vom Konsortialpartner Kayser-Threde entwickelt und gebaut. Zu sehen ist der Primärspiegel von der Rückseite beim Einheben in das Flugzeug.

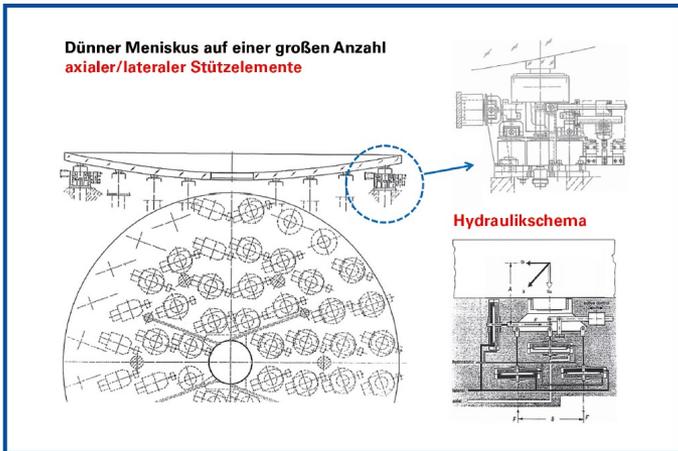
Der Spiegel selbst ist monolithisch aus einem Stück Glaskeramik der Firma Schott gefertigt. Er wurde von REOSC in Frankreich auf der Rückseite leichtgewichtet – die Rippen und Wabenstruktur ist auf dem Bild zu erken-

gels beim Kippen im Flugzeugschacht in den optischen Genauigkeiten von Nanometern bleiben.

2.4.2 | Alternative Primärspiegel-Technologien

Für den Primärspiegel wurde – wie schon erwähnt – in der 1988er Design-Studie von Zeiss ein dünnwandiger Meniskus auf insgesamt 64 kombinierten axialen und lateralen Unter-

Abbildung 2.31:
Ein möglicher Entwurf für den Primärspiegel basierte auf einem dünnen Meniskusspiegel, der durch eine große Zahl axialer und auch radialer hydraulisch betriebener Mechanikkomponente unterstützt wird. Rechts oben der Entwurf der hydraulischen Unterstütsungselemente, rechts unten das Hydraulikschema. © H. Kärcher



nen, das Rot stammt vom durchscheinenden Schutzdeckel auf der Spiegelvorderseite – und auf die erforderliche Genauigkeit von Nanometern poliert (Abb. 2.30).

Der Spiegel selbst ist in ausgeklügelter Weise auf der sogenannten Spiegelzelle gelagert, die aus Temperaturgründen aus Kohlefasermaterial in Augsburg gefertigt wurde. Die im Bild sichtbaren Wiegebalken (whiffle trees) stellen sicher, dass die Verformungen des Spie-

stützungselemente vorgeschlagen, die den Spiegel aktiv auf Form halten müssen (Abb. 2.31). Dieser Vorschlag war den damals parallel laufenden Entwicklungen für erdgebundene Teleskope geschuldet. Bei ESO sind zum Beispiel das New Technology Telescope NTT (3m Spiegeldurchmesser) und die Very Large Telescopes VLT (8m Spiegeldurchmesser) mit derartiger Spiegeltechnologie ausgerüstet.

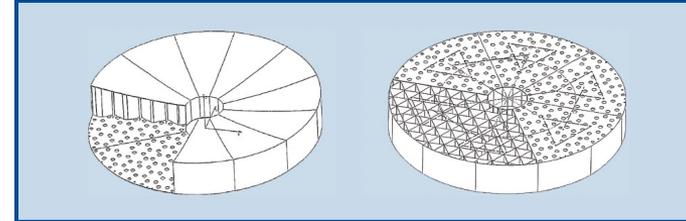


Abbildung 2.32:
Entwurf des SOFIA Hauptspiegels basierend auf einer Silizium-Karbid-Sandwich-Struktur in 12 einzelnen „Kuchenstücken“. © Kärcher.

Diese Spiegeltechnologie ist im Nachhinein als für ein Flugzeugteleskop völlig ungeeignet einzuschätzen.

Während der Detailkonstruktionsphase in 1997–98 kontaktierte die Raumfahrtfirma IABG in München die Geschäftsleitung von MAN und versuchte Druck auszuüben, für SOFIA einen Primärspiegel aus Kohlenstoffaserverstärktem Silizium-Karbid zu verwenden. Dieses Materialtechnologie, die man etwas verkürzt als „keramisierte Kohlefaser“ bezeichnen könnte, wurde von IABG damals für Raumfahrtanwendungen verwendet. Der 2,7 m Spiegel von SOFIA sollte aus 12 separaten „Kuchenstücken“ zusammengesetzt werden, da man noch nicht in der Lage war, ihn bei seiner Größe in einem einzigen Stück herzustellen (Abb. 2.32). Die Technologie wurde später beim Primärspiegel für das Sonnenteleskop GREGOR erprobt, der nur einen Durchmesser von 1,5 m hat, und versagte dort letztendlich. Es wurden mehrere Prototypen erstellt, die sämtliche bei der Fertigung zersprangen, und GREGOR wurde zum Schluss mit einem Leichtgewicht-Spiegel aus Zerodur ausgerüstet, ähnlich dem SOFIA-Spiegel. Die Silizium-Karbid-Technologie ist offensichtlich für große Spiegel ungeeignet!

2.4.3 | Auswahl des Spiegellieferanten

In der Angebotsphase 1996 wurde Kontakt mit verschiedenen Herstellern von Leichtgewicht-Spiegel aufgenommen und deren Fertigungspotentiale abgefragt.

Es waren dies:

Schott + »Finisher«

Die Firma Schott in Mainz, die die bis heute im Teleskopbau weltweit führende Glaskeramik Zerodur herstellt, allerdings aber keine Expertise für die Endbearbeitung des Spiegels hat.

Kodak/Excelsis

Excelsis (früher Kodak), die einen Leichtgewicht-Spiegel in der Bauart des Hubble-Teleskops vorschlugen, der aus ULE-Silikat-Glas von Corning hergestellt ist.

Universität von Arizona

Einen Leichtgewicht-Spiegel des Mirror Lab der Universität von Arizona, der aus gegossenem Quarzglas besteht.

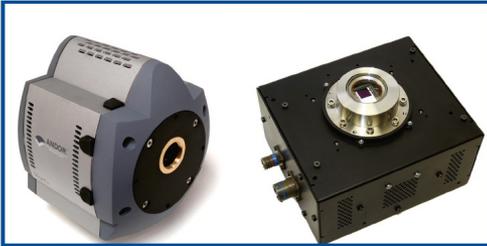
REOSC

Einem aus einem Leichtgewicht-Spiegel, der monolithisch aus einem einzigen großen Zerodur-Block durch Ausfräsen hergestellt wird. Die Firma REOSC wurde letztendlich für die Herstellung und Lieferung des Spiegels ausgewählt.



2 | Das Stratosphärische Observatorium für Infrarot Astronomie

Abbildung 2.59: Die Standardversion der Andor iXon DU-888 Kamera, wie sie beim FFI+ eingesetzt wurde (links), und die für die Stratosphärenbedingungen angepasste Version für WFI+ und FFI+ (rechts). (Quelle: DSI)



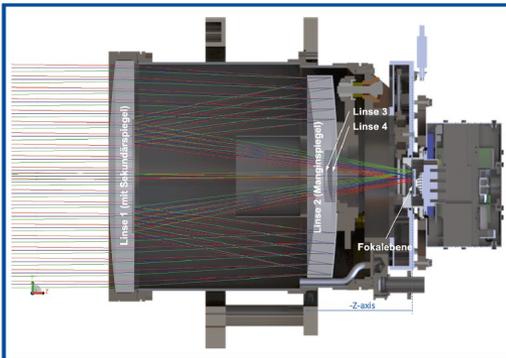
mit einem Laptop *stand-alone* betrieben werden und wurde in diesem Modus regelmäßig für wissenschaftliche Beobachtungen und für Messungen der Ausrichtstabilität des Teleskops bei Frequenzen bis zu 200 Hz eingesetzt (mehr dazu in Kapitel 2.5.3 und 2.9.6).

Verbesserung der Frontring Kameras

Neben dem Gewinn an Empfindlichkeit hatte das neue Kamerasystem des FFI+ mit seinem zugehörigen Kamera-Steuerrechner einige weitere Vorteile, wie z.B. die Nutzung modernerer Komponenten und Schnittstellen, die die Datenverarbeitung und Ansteuerung der

boranwendungen oder die Nutzung an bodengebundenen Teleskopen ausgelegt, nicht aber für die extremen Bedingungen in der Stratosphäre, denen der WFI und FFI ausgesetzt sind. Gemeinsam mit Andor wurde deshalb die Entwicklung einer modifizierten iXon DU-888 Kamera begonnen, um die Kamera auch unter Stratosphärenbedingungen zuverlässig einsetzen zu können. Neben einer modifizierten Datenschnittstelle und Spannungsversorgung mussten vor allem die interne Programmierung der Kamera angepasst und einige Bauteile in der Elektronik getauscht werden. Dadurch wurde die Ansteuerung des CCDs bei extremen Temperaturen deutlich robuster, bei

Abbildung 2.60: Schnittdarstellung des FFI+. Das Licht fällt von links ein, die verschiedenen Farben der Lichtstrahlen repräsentieren Lichtquellen an den Bildrändern (grün und rot), sowie in der Bildmitte (blau). © Wiedemann



Kameras deutlich schneller und effizienter machten. Es wurde daher entschieden, auch die WFI und FFI Kameras durch möglichst baugleiche Kameras von Andor zu ersetzen. Diese Kameras waren jedoch in erster Linie für La-

gleichzeitig minimalen Einbußen in der Performance der Kamera. Auch mechanisch gab es einige Änderungen: Das Vakuumgehäuse und Fenster wurden so modifiziert, dass trotz der großen Temperaturänderungen keine Span-

2.6 | Die Teleskopoptik



Abbildung 2.61: Der Fine Field Imager +, bereit für die Installation auf SOFIA. Im Vordergrund sieht man die große Linse 1 aus Quarzglas mit dem zentral auf die Linse gedampften Sekundärspiegel, in dem sich das DSI Logo spiegelt. (Quelle: DSI)

nungen durch differenzielle thermische Ausdehnung in das Eintrittsfenster eingetragen wurden. Außerdem wurde ein neues Kameragehäuse entworfen, das alle mechanischen Lastanforderungen für den Flugbetrieb erfüllte. Abbildung 2.59 zeigt die Standardversion und die für WFI+ und FFI+ angepasste Version der Andor iXon DU-888 Kamera.

Um das Defokussproblem des FFI zu beheben und die Abbildungsqualität des WFI zu verbessern, mussten beide Optiken verbessert werden. Für den FFI wurde von der italienischen Teleskopfirma Officina Stellare eine Optik entwickelt, die speziell an die Anforderungen von SOFIA angepasst war. Basierend auf

handelt, d.h. eine Meniskuslinse, die auf der Rückseite verspiegelt ist. Abbildung 2.60 zeigt eine Schnittdarstellung des FFI+ mit dem Strahlengang des Lichtes. Die optischen Elemente wurden von einem Tubus aus CFK und Titan gefasst. Titan wurde vor allem wegen des um einen Faktor 2,7 geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten gegenüber Aluminium gewählt, um Längenänderungen und thermische Lasten bei den großen Temperaturunterschieden zu minimieren. Die Temperaturstabilität des neuen FFI+ wurde in thermischen und optischen Simulationen und später auch in vielen Stunden Testzeit in einer Thermalkammer verifiziert (Abb. 2.61).



Abbildung 2.62: Der Wide Field Imager +, ebenfalls bereit für die Installation in zwei Ansichten: von der Seite (links) und von oben (rechts). Die Optik ist in dem schwarzen Zylinder untergebracht. Das graue Filterradgehäuse in der Mitte ist aus Titan gefertigt. Darunter sieht man die Kamera im schwarzen quaderförmigen Gehäuse mit den runden „Mil-Spec“-Steckern, die besonders robust und für die Anwendung im Flugzeug ausgelegt sind. Filterrad und Kamera sind bei WFI+ und FFI+ baugleich. In der Draufsicht rechts erkennt man die drei Punkte an denen der WFI+ an die SOFIA Teleskopstruktur geschraubt werden sollte (bestehend jeweils aus drei bzw. vier Bohrungen). Bei den zwei oberen Punkten erkennt man schneckenförmige Federelemente, die durch Drahtroderieren in die Aluminiumplatte geschnitten wurden. Diese dienen als Kompensationselemente, um thermische Spannungen zwischen der CFK-Sturktur des SOFIA Teleskops und der Aluminiumplatte des WFI+ zu minimieren. (Quelle: DSI)

dem kommerziellen Riccardi-Honders Teleskop „RH Veloce“ entwarf der Optiker Massimo Riccardi ein 300 mm $f/2,2$ Teleskop, bei dem alle optischen Elemente aus dem besonders temperaturstabilen Quarzglas gefertigt sind. Das Teleskop besteht aus vier Linsen, wobei es sich bei der zweiten Linse um einen Manginspiegel

Die Verbesserung der Abbildungsqualität des WFI hatte eine geringere Priorität, konnte jedoch auch mit überschaubarem Aufwand realisiert werden. Anstatt einer neuen Einzelanfertigung wurden verschiedene kommerzielle Foto- und Videoobjektive auf ihre thermische Stabilität getestet. Ein hochwertiges Objektiv



Die wissenschaftlichen Instrumente

3.1 | GREAT – ein hochauflösendes Spektrometer

R. Güsten, J. Stutzki, H.-W. Hübers, B. Klein für das GREAT-Team

3.1.1 | Die Idee und ihre Geschichte

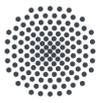
GREAT (*German REceiver for Astronomy at Terahertz frequencies*), das Heterodyn-Instrument für den Einsatz auf SOFIA, wurde für spektral hochauflösende Beobachtungen im fern-infraroten Spektralbereich entwickelt. Dieser Bereich wird auch Terahertz- oder THz-Bereich genannt, ist jedoch erdgebundenen Observatorien verschlossen. Das Instrument arbeitete in ausgewählten Frequenzbändern zwischen 0,5 und 5 THz, die durch die astrophysikalische Fragestellung definiert wurden.

SOFIA war ursprünglich als Vorläufer der Herschel-Weltraummission geplant. Dies galt insbesondere hinsichtlich der Entwicklung von Schlüsseltechnologien für die Instrumentierung, sowohl im hochfrequenten Submillimeter- wie auch im Ferninfrarot (FIR)-Spektralbereich. Dementsprechend war die Auswahl der ersten Runde von Instrumenten gestaltet, die gemeinsam zwischen der amerikanischen und der deutschen Community abgestimmt wurde. Im Bereich der hochauflösenden Spektroskopie, die aus technologischen Gründen auf den längerwelligen FIR-Bereich beschränkt war, waren deshalb zwei SOFIA-Instrumente in Planung und schließlich im Bau: Das am Caltech, USA zu entwickelnde CASIMIR Instrument, sowie das GREAT Instrument, das am MPI für Radioastronomie, Bonn, und am I. Physikalisches Institut der Universität zu Köln beheimatet sein würde. CASIMIR war dafür konzipiert, genau die Wellenlängenbereiche zwischen den von der Erdatmosphäre geblockten Fenstern im submm-Bereich abzudecken. GREAT dagegen war von vornherein als zweikanal-Instrument geplant, zunächst aber nur für den Einsatz bei Frequenzen oberhalb 1,8 THz (siehe Abschnitt 3.1.6).

Durch die massiven Verzögerungen von SOFIA wurden diese Perspektiven komplett überholt. Ursprünglich war ein Betriebsbeginn um 2004 geplant; tatsächlicher erfolgte der erste Wissenschaftsflug erst 2010. Trotz

der auch bei Herschel aufgetretenen Verzögerungen (Start schließlich 2009, gegenüber dem ursprünglich geplanten Start in 2007) lagen die ersten spektral hochauflösenden Beobachtungen in diesem neu erschlossenen Spektralbereich mit dem HIFI (Heterodyn Instrument for the Far-Infrared) in seinen sieben Frequenzbändern bereits vor, als SOFIA schließlich den Betrieb aufnahm. Wegen der mit den Verzögerungen verbundenen Kosten wurde auf amerikanische Seite das Instrumentenprogramm reduziert und neben dem zu Herschel/PACS weitgehend komplementären AIRESPROGRAMM auch die Entwicklung des CASIMIR aufgegeben. Da die Finanzierung von GREAT auf deutscher Seite, unabhängig vom Weltraum-Budget, von den beiden federführenden Instituten getragen wurde, konnten diese die zusätzliche Zeit nutzen, um das Instrument kontinuierlich zu verbessern und den

Beim ersten Treffen zwischen den FAA DERs und den US ST-Teams in Waco saß ich zufällig neben Tony Mori, einem Betriebsingenieur von United Airlines, der einen ausgeprägten Sinn für Humor hatte. Einer nach dem anderen gaben die Pls der Instrumente einen Überblick über ihre wichtigsten wissenschaftlichen Ziele und die technischen Komplikationen, die sich aus diesen Zielen für ihre Instrumente ergaben. Die kryogene Kühlung war natürlich ein wichtiger Bestandteil dieser Präsentationen. Die Instrumente wurden in der Reihenfolge der zunehmenden Wellenlänge vorgestellt, und die Kryotechnik wurde immer esoterischer. Flüssiger Stickstoff? Pah! Wir verwenden flüssiges Helium. Helium? Pah! Wir verwenden gepumptes He3. Und so weiter. Das letzte Instrument war HAWC, mit seinem adiabatischen Entmagnetisierungskühlschrank. Die Augen wurden glasiert. Zum Glück war die Zeit für eine Kaffeepause gekommen. Tony sah mich an und sagte: „Ted, weißt du, was dieses Projekt ist? Es ist eine Mischung aus ‚Dilbert‘ und ‚The Far Side‘.“ Ich kann mir immer noch keine bessere Zusammenfassung der Situation vorstellen. Es war eine Enttäuschung für mich, als sich United nach dem 11. September aus SOFIA zurückziehen musste, und ich hatte keine Gelegenheit, Tony besser kennen zu lernen.
T. Dunham



4 | Der Betrieb des Flugzeugobservatoriums

dig machte. Da die Einreise-Formalitäten aber in Christchurch angemeldet waren durfte die Crew das Flugzeug in Auckland nicht verlassen. Das zusätzliche Kerosin wurde mit der dienstlichen Kreditkarte des NASA Crew Chiefs be-

Das wissenschaftliche Pensum, das abzuarbeiten war, hatte sich inzwischen mehr als verdoppelt. In den sechs Wochen vom 12.06. bis 24.07.2015 galt es 19 Beobachtungsfüge zu absolvieren. GREAT war dabei nicht mehr das

Abbildung 4.67:
Die beiden Piloten Dean Neeley (l.) und Manny (Emmanuel E.) Antimissaris (m.) zusammen mit Flugingenieur Matt Pitsch (r.) auf dem Wissenschaftsflug zur Bedeckung des Neptunmondes Triton. Wenn ihre Zeit es erlaubte, waren viele der SOFIA Pilotinnen und Piloten nicht nur zu einem Pausch aufgelegt, sondern zeigten sich auch interessiert an der Arbeit des jeweiligen Wissenschaftsteams und an dessen Ergebnissen. Ein Gast war auf dem freien Platz hinter dem linken Pilotensitz stets willkommen
© Terry Oswalt, Daytona Beach University Campus



zählt, die durch die geöffnete Notausstiegs Luke am Nasenfahrrack heraus gereicht wurde.

Der letzte Wissenschaftsflug konnte wegen dichten Nebels in Christchurch dort nicht landen. SOFIA musste auf die Nordinsel nach Auckland ausweichen und kehrte einen Tag später nach Christchurch zurück, um dort für den Rückflug nach Palmdale beladen zu werden. Das GREAT-Team bekam die Auswirkungen zu spüren. Geplant war, morgens mit SOFIA in Christchurch zu landen und am Abend nach ein paar Stunden Schlaf über Auckland und Los Angeles nach Deutschland zurückzuflogen. Das GREAT-Team musste also nun schnell Tickets für einen Linienflug von Auckland nach Christchurch organisieren. Der Nebel in Christchurch hielt sich hartnäckig und der Linienflug wurde nach Dunedin umgeleitet und kam mit großer Verspätung erst an, als Tāwhirimātea, der Wettergott, ein Einsehen hatte.

2014 fand kein Neuseeland-Deployment statt, da SOFIA sich zu dieser Zeit planmäßig bei Lufthansa-Technik in Hamburg zur Wartung, genauer, zum Heavy Maintenance Visit (HMV) befand.

Ein Jahr später hieß es wieder *Kia Ora* (Maori für: „Hallo!, alles Gute, Viel Glück!, die besten Wünsche!“) und die Flüge aus Neuseeland wurden wieder aufgenommen.

einziges Instrument. Bereits auf dem Transferflug von Palmdale nach Honolulu wurde mit FORCAST beobachtet. Nach drei Flügen mit FORCAST wurde auf die Instrumentenkombination FLITECAM und HIPO, liebevoll *FLIPO* genannt gewechselt. Nach einem Testflug am Vortag beobachtete dann FLIPO und FPI+ die am 29. Juni über dem Pazifik stattfindende Sternbedeckung durch den Zwergplaneten Pluto. Nach diesem erfolgreichen Intermezzo wurde FORCAST wieder installiert und die Beobachtungen fortgesetzt. Das Deployment endete mit einer kurzen GREAT-Kampagne.

Schon zu Beginn des Deployments zeigte sich, dass auch der Süd-Winter einen Einfluss auf die Beobachtungen haben kann. Bislang wurde SOFIA noch nie in loing-Conditions betrieben. Eine Einteisung des Flugzeugs war wegen der empfindlichen Optiken nicht vorgesehen und so fielen vier Flüge der kalten, feuchten Wetterlage zum Opfer: Der Flight-Engineer entdeckte bei seinen Preflight-Checks Raureif auf den Tragflächen.

Das Deployment 2016 brachte FORCAST und das inzwischen modernisierte GREAT Instrument, bekannt als upGREAT zurück nach Neuseeland. Zusammen mit dem Südhälbkugel-Debütanten FIFI-LS sollten 25 Wissenschaftsflüge über einen Zeitraum von nun 8 Wochen zwischen dem 05.06. und dem 26.07.2016 durchgeführt werden. Die sehr gu-

ten Beobachtungsbedingungen und die wissenschaftlich interessanten Ziele, darunter wieder die Magellanschen Wolken und das Galaktische Zentrum, trieben die Projekt- und Missionsplaner zu immer längeren Südhälbkugel-Deployments. Nun, zum dritten Besuch in Christchurch, stellte sich eine gewisse Routine bei der Planung, der Logistik und der Durchführung des Deployments ein, und Christchurch wurde für das SOFIA-Team zum *Home away from home*.

Aber auch dieses Deployment brachte seine Herausforderungen mit sich. Nach nur drei Flügen mit upGREAT wurde ein Riss an einem der vier Triebwerke entdeckt. Die Diskussionen begannen sofort: Kann der Riss repariert werden? Direkt neben dem Flughafen gab es eine Niederlassung des Triebwerksherstellers Pratt and Whitney. Oder musste das Triebwerk getauscht werden, und ggf. wo? In Christchurch gab es kein Ersatz-Triebwerk. Konnte SOFIA mit dem beschädigten Triebwerk zurück nach Palmdale fliegen und dort ein neues Triebwerk bekommen? Müssten sich Flugzeug und Ersatz-Triebwerk in Auckland treffen, um den Wechsel in einem Hangar durchzuführen? Nach einiger Zeit kristallisierte sich heraus, dass die sicherste Variante ein Triebwerks-Wechsel in Christchurch ist. Es wurde also ein Ersatz-Triebwerk

in Palmdale vorbereitet und ein 747 Jumbojet gechartert, der das Triebwerk direkt von Palmdale nach Christchurch flog. Der Wechsel fand dann bei winterlichen Bedingungen auf dem Vorfeld des USAP statt. Nach ausgiebigen Testläufen am Boden war SOFIA nach einer 14-tägigen Beobachtungspause wieder einsatzbereit und die FIFI-LS und FORCAST Flüge konnten stattfinden.

Das Deployment 2017 hatte 25 Beobachtungsfüge im 8 Wochen-Zeitraum vom 22.06. bis 13.08.2017 mit FORCAST, upGREAT/4GREAT und FIFI-LS, sowie die Beobachtung einer Sternbedeckung mit dem Instrument FPI+ auf dem Plan stehen. Das Deployment begann mit einer upGREAT Serie. Nach dem Wechsel auf den 4G-Kanal stand eine Sternbedeckung an, die diesmal nur mit FPI+ beobachtet wurde. Das Ziel war TNO 2014 MU69 Arrokoth, ein Objekt im Kuipergürtel, das zur Unterstützung der NASA *New Horizons* Mission beobachtet wurde. Der Flug verlief wieder sehr erfolgreich und erbrachte erneut den Beweis, dass SOFIA auch sehr lokal begrenzte und dynamische Phänomene beobachten kann. Schon wenige Wochen später stand die nächste Okkultation an, für die SOFIA von Daytona Beach in Florida aus starten sollte. Es folgten Beobachtungsserien mit 4GREAT, FIFI-LS und FORCAST.

Abbildung 4.68:
Dies während des Neuseeland Deployments 2018 aufgenommene Foto zeigt, dass SOFIA und das Team auch mit nass-kaltem neuseeländischen Winterwetter klarkommen mussten. Manchmal fielen Flüge auch dem Raureif auf den Tragflächen zum Opfer.
© F. Behrens



5.2 | Die Vergabe der deutschen SOFIA Beobachtungszeit

Maja Kazmierczak-Barthel

SOFIA wurde wie ein normales astronomisches Observatorium betrieben. Das bedeutet, dass sich Wissenschaftler aus der ganzen Welt für Beobachtungszeiten bewerben konnten, indem sie ihre Vorschläge einreichten. Ein Beobachtungsvorschlag ist ein Antrag, der erklärt, was, warum und wie jemand mit einem bestimmten Teleskop beobachten möchte.

Ein typisches bodengebundenes astronomisches Observatorium bietet zweimal im Jahr die Möglichkeit, sich für eine Beobachtungszeit zu bewerben. Das bedeutet, dass Wissenschaftler ihre Vorschläge zweimal im Jahr bis zu einem bestimmten Datum (einer Frist) einreichen können. Die Vorschläge werden von den Experten bewertet und bei entsprechender wissenschaftlicher Qualität für die Beobachtung freigegeben. Daraufhin können die angenommenen Vorschläge an die Teleskope geschickt und die vorgeschlagenen Objekte beobachtet werden. Für einen bestimmten Vorschlag gibt es immer einen Hauptautor oder eine Hauptautorin, der oder die Principal Investigator (PI) genannt wird. Darüber hinaus arbeiten in der Regel einige weitere Personen als Co-Autoren oder Co-Is (Co-Investigators genannt) an dem Projekt mit.

Für eine flugzeuggestützte Sternwarte war die Planung der angenommenen Vorschläge eine komplizierte Aufgabe. Denn wir mussten die nördliche und südliche Hemisphäre und einige wissenschaftliche Instrumente, die am Teleskop montiert sind, in mehrwöchigen Perioden berücksichtigen. Aus diesem Grund nahm SOFIA nur einmal im Jahr Vorschläge an. In der Geschichte von SOFIA gab es elf Beobachtungszyklen mit Ausschreibungen (Calls for Proposals, CfP), darunter Zyklus 0 – die wissenschaftliche Demonstrationsphase. Abbildung 5.12 zeigt als Beispiel das Deckblatt des Call for Proposal für Cycle 4.

Darüber hinaus gab es, da SOFIA als 80/20 NASA-DLR-Partnerprogramm organisiert war, zwei separate Aufforderungen zur Einreichung von Vorschlägen:

- Der von NASA und USRA organisierte Aufruf zur Einreichung von Vorschlägen stand allen qualifizierten Astronomen in den USA und außerhalb der USA offen, mit Ausnah-

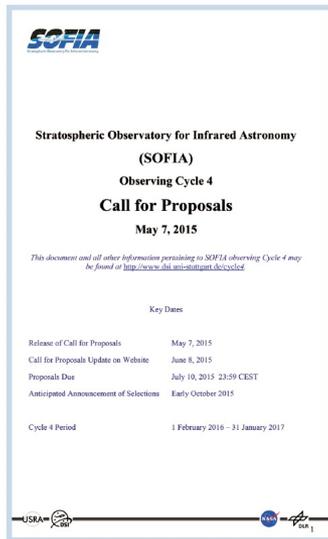


Abbildung 5.12: Deckblatt des deutschen Call for Proposal für den Cycle 4 im Jahr 2015. © DSI

me derjenigen Astronomen, die zu der Zeit mit deutschen Institutionen verbunden waren. Allerdings galten Wissenschaftler, die ihren Sitz zwar in Deutschland hatten, aber mit der Europäischen Südsternwarte (ESO) oder der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) verbunden waren, nicht als mit einer deutschen Einrichtung verbunden und konnten sich ebenfalls an dieser Ausschreibung beteiligen. Die USA Seite vergab 80 % der SOFIA-Beobachtungszeit.

- Die von der DSI im Auftrag des DLR verwaltete Aufforderung zur Einreichung von Vorschlägen stand allen qualifizierten Astrono-

5.2 | Die Vergabe der deutschen SOFIA Beobachtungszeit

men offen, die einer deutschen Forschungseinrichtung angehörten.

SOFIA stand in dieser Situation keineswegs allein dar. Es gibt weltweit viele Observatorien mit einem Konsortium internationaler Eigentümer, die ebenfalls separate Ausschreibungen durchführen.

Im Rahmen der Aufforderung zur Einreichung von Beobachtungsvorschlägen gab es verschiedene Arten von Programmen:

- Normale Programme für Objekte mit bekannten Positionen und definierter vorgeschlagener Beobachtungszeit.
- Multi-Cycle-Target-Monitoring-Programme, die wissenschaftliche Untersuchungen im Bereich der zeitlichen Überwachung von Objekten ermöglichen, insbesondere die veränderlicher Sterne, bekannter irregulärer transients Quellen usw..
- Target of Opportunity – Vorschläge mit bekannten Zielen, aber unbekanntem Beobachtungszeitpunkt. Dazu gehören etwa z. B. eine identifizierte wiederkehrende Nova, wenn sie ausbricht. Dazu gehören außerdem Programme, die zwar auf eine Klasse von astronomischen Ereignissen abzielen, deren Ort und Zeitpunkt aber noch unbestimmt sind. Dazu gehören etwa z. B. noch nicht identi-

fizierte Kometen oder eine Supernova oder ein aufleuchtender junger Stern.

• Durchmusterungsprogramme (Survey Programs), um Studien einer größeren Stichprobe zu ermöglichen. Solche Beobachtungen, bei denen das Observatorium aus einer langen Liste von Objekten auswählen kann, waren sehr beliebt, weil es dem SOFIA-Programm Flexibilität bei der Flugplanung gab.

• Das Thesis-Enabling-Programm sollte Doktoranden an deutschen Institutionen unterstützen, um ihre Chancen auf den Abschluss des Programms zu erhöhen. Während auf amerikanischer Seite bei Erfolg von dort ansässigen Doktoranden auch eine gewisse Finanzierung der Doktorandenstelle durch die NASA erfolgte, war dies für deutsche Doktoranden nicht der Fall. Deren Stellenfinanzierung erfolgte vollständig über deren Heimat-institute.

• Zusätzlich zu den oben genannten Programmen nahm das SOFIA-Programm Vorschläge für die sogenannte Director's Discretionary Time (DDT) an. Diese Kategorie war für kurze, dringende Beobachtungen gedacht, die zum Zeitpunkt der Antragsankündigung nicht vorhersehbar waren, und die nicht bis zum nächsten Antragszyklus warten konnten.

Abbildung 5.13: Sitzung des Beobachtungszeitvergabe-Komitees (TAC) im Oktober 2015, das ausnahmsweise an der Ostküste der USA stattfand. Hier v.r. Hans Zinnecker (Chair), Maja Kazmierczak-Barthel (TAC Secretary), Johannes Staguhn, Bruce Wilking, Suzanne Madden. © J. Black





5 | Das Deutsche SOFIA Institut an der Universität Stuttgart

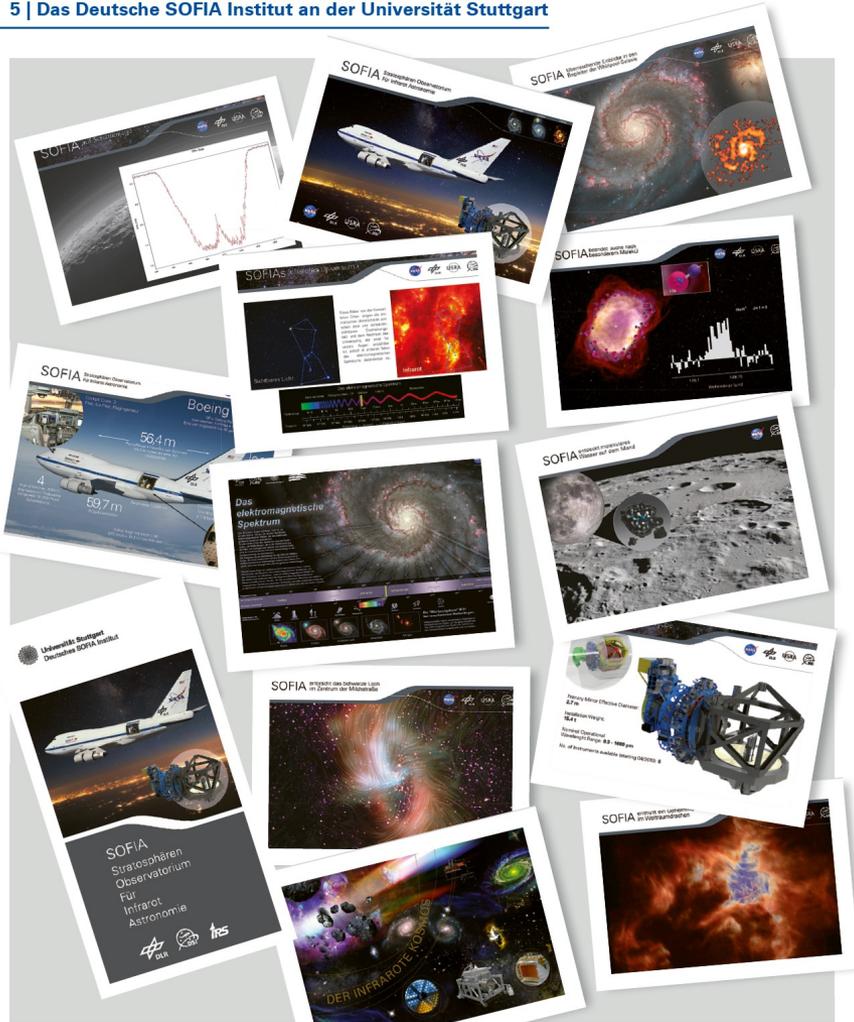


Abbildung 5.27: Mit den DLR Projektgeldern war das DSI in der Lage, eine große Palette unterschiedlicher Infomaterialien zu produzieren. © DSI

5.3 | Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit



Abbildung 5.28: Regelmäßig stellte das DSI zusammen mit Kollegen und Kolleginnen vom DLR und auch aus den USA der Öffentlichkeit das SOFIA Projekt vor und beantwortete Fragen. © DSI

Planetarien erreichen nicht nur Schulklassen aller Altersstufen, sondern auch einen großen Teil unserer Gesellschaft, so dass sie auch für die DSI-Öffentlichkeitsarbeit zum SOFIA-Projekt eine wesentliche Rolle spielten. Von 2009–2023 gab es unter anderem eine SOFIA – Dauerausstellung im Planetarium Stuttgart, und die mobile Wanderausstellung des DSI war in mehreren deutschen Planetarien wochenweise ausgestellt. In der Regel fand zur Eröffnung der Ausstellung ein Vortrag zum fliegenden Observatorium und seiner wissenschaftlichen Mission statt.

Seit 2019 gibt es sogar zwei Planetariumsshows zum Projekt. Eine wurde von Gernot Meiser¹ & Pascale Demy vom Atelier für audiovisuelle Medien in Saarlouis speziell für das mobile Planetarium des Ateliers produziert. Die zweite Show „50.000 Fuß über dem Meer – Die flie-

gende Sternwarte SOFIA“ entstand in einer Kooperation zwischen dem Planetarium Laupheim und einer DSI Partnerschule. Der Film vermittelt die Atmosphäre an Bord von SOFIA während eines Beobachtungsfluges, bevor die Zuschauer und Zuschauerinnen in die Säulen der Schöpfung im Adlernebel eintauchen.

Für die politischen Entscheidungsträger produzierte das DLR zusammen mit dem DSI und einer Partnerschule (siehe Kapitel 5.3.3) einen speziellen 3D-Film. Die beiden Protagonisten, eine Schülerin und ein Schüler des Gottlieb-Daimler-Gymnasiums in Stuttgart, erklären darin die Besonderheiten der Sternwarte und unterhalten sich darüber, was für eine nachhaltige Faszination dieses Projekt auf den technisch und naturwissenschaftlich orientierten Nachwuchs ausübt. In einem Gespräch mit Politikern im Reichstag in Berlin erhalten die

6 | SOFIAs Wissenschaftliche Ergebnisse

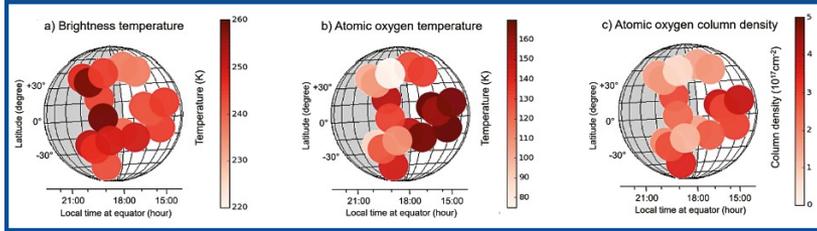


Abbildung 6.2: Venus-Beobachtungen der atomaren Sauerstofflinie mit dem upGREAT-Hochfrequenz-Array bei 4,77Hz: An drei aufeinanderfolgenden Nächten decken verschiedene der sieben upGREAT Pixel im H-Kanal auf verschiedene Weise die Tag- und Nachtseite (weiß und grau unterlegt) der Venus ab. Dieses Vorgehen erlaubte, die Variation der Sauerstoff-Konzentration in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung zu untersuchen. Die drei Bilder zeigen die Helligkeit der Linie: Links, wie in der Radioastronomie üblich auf der sogenannten Helligkeits-Temperatur-Skala angegeben, sowie die Temperatur (Mitte) und Säulendichte (rechts) des atomaren Sauerstoffs (in Atomen pro cm^2), die aus diesen Messungen abgeleitet wurden. Die auf der Tagseite erhöhten Temperaturen und die Abnahme der Häufigkeit von atomarem Sauerstoff auf der Nachtseite ist deutlich zu sehen. © Hübers et al. [1]

des hochfrequenten upGREAT-Arrays konnten dabei gleichzeitig verschiedene Positionen auf Venus auf der Tag- und auf der Nachtseite abdecken und damit, im Vergleich zu Modell-Rechnungen der Venus-Atmosphäre, die durch die wechselnde Sonneneinstrahlung veränderte Chemie in der Venusatmosphäre untersuchen.

Wissenschaftlich Ähnliches gilt für die von einem Kometen beim Eintritt in das innere Sonnensystem abdampfende Atmosphäre. Die Be-

obachtung eines solchen Kometen erlaubte die Bestimmung des Isotopenverhältnisses von Wasserstoff (H) und schwerem Wasserstoff (D) im Wassermolekül (H_2O bzw. HDO), was einen wichtigen Rückschluss auf die Entstehung des Wassers im Sonnensystem gibt. Dies konnte mit GREAT bei Beobachtungen des Kometen 46P/Wirtanen demonstriert werden (Abb. 6.4). Für solche Beobachtungen ist die hohe spektrale Auflösung des GREAT-Instruments essentiell, da die Spektrallinien der abdampfenden Kometenatmosphäre extrem schmal sind.

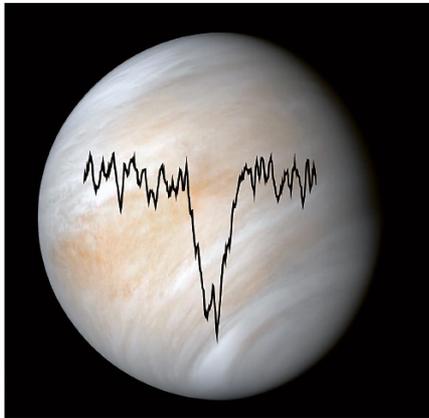


Abbildung 6.3: Absorptionsspektrum von atomarem Sauerstoff bei 4,74 Terahertz (schwarze Linie) vor dem Hintergrund der Venus. © Hübers et al. [1]

6.2 | Sonnensystem

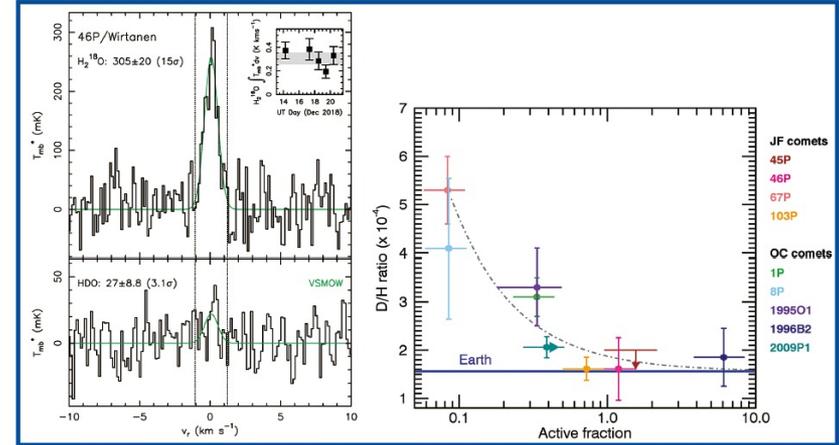


Abbildung 6.4: Links oben: GREAT-Beobachtung des Kometen 46P/Wirtanen in einer Spektrallinie von nicht-deutერიertem Wasser (H_2^{18}O), allerdings dem ^{18}O Isotop (H_2^{18}O -Isotopomer). Links unten: GREAT Beobachtungen von schwerem Wasser (HDO). Die beide Spektrallinien in derselben Region entstehen, haben sie identische Linienprofile. Lediglich die Intensität ist unterschiedlich, entsprechend der Häufigkeit der jeweiligen Spezies. Die grüne Linie oben zeigt das angepasste Linienprofil an die relative starke H_2^{18}O -Linie. Die grüne Linie links unten hat dieselbe Position und Breite wie die Linie links oben, lediglich die Amplitude wurde entsprechend der schwächeren Intensität angepasst. Das Intensitätsverhältnis der beiden Linien erlaubt, es die Häufigkeit von Deuterium, D, gegenüber normalem Wasserstoff, H, in der abdampfenden Kometenatmosphäre zu bestimmen (rechts Bild, der Wert für den Kometen 46P/Wirtanen ist das hellrot-gefärbte Kreuz). Im Vergleich zu entsprechenden Messungen an anderen Kometen erweist sie sich als nahezu gleich zu der terrestrischen Konzentration. Dies Ergebnis lässt Rückschlüsse auf die immer noch offene Frage nach dem Ursprung des Wassers auf der Erde bei der Bildung des Sonnensystems zu. © Lis et al. [2]

6.2.2 | FORCAST: Jupiter

Terry Herter

Die äußeren Planeten sind viel kühler als die Erde, strahlen aber dennoch viel Licht im Infrarotbereich ab. Dies geschieht zusätzlich zu dem sichtbaren Licht, das sie von der Sonne reflektieren. Abbildung 6.5 zeigt Bilder, die FORCAST bei 5,4 Mikrometern Wellenlänge aufgenommen hat. Die hellen Streifen und Flecken (dunkle Regionen im Bild) treten in Regionen auf, in denen die Atmosphäre des Jupiters relativ transparent ist, d. h. diese Beobachtungen reichen tief in die Jupiteratmosphäre hinein. Solche Regionen sind schon seit Jahrzehnten bekannt; sie verändern sich jedoch ständig auf Zeitskalen von Tagen bis zu Monaten. Diese Daten deuten darauf hin, dass die Emission aus einer Tiefe stammt, in der die Atmosphäre etwa 28°C beträgt, viel höher als am oberen Wolkenrand, an dem die Temperatur nur -100°C und kälter ist.

Anlässlich unseres Pluto-Bedeckungsflugs 2011 schenkte mir Edna DeVore ein Maskottchen für HIPO, ein ausgestopftes Nilpferd mit verschiedenen aufgenähten Aufnähern.



Edna arbeitet am EPO-Teil von SOFIA, und ich kannte sie noch aus ihrer Zeit, als sie 20 Jahre zuvor ähnliche Arbeit für KAO geleistet hatte. Es war ein sehr rührendes Geschenk, und es hatte später auch noch ein zweites Leben.



Als wir nämlich begannen, mit FLITECAM in der FLIPO-Konfiguration zu fliegen, modifizierte Erin Smith das Nilpferd, indem sie ihm Flügel aus Spielzeug-Hasenohren und einen silbernen Heiligenschein hinzufügte. Und Schwups! hatten wir das FLIPO-Maskottchen. T. Dunham

6 | SOFIAs Wissenschaftliche Ergebnisse

6.5.2 | FLITECAM:
NGC 2024

Ian McLean

Die im vorherigen Abschnitt genannte Sternentstehungsregion NGC 2024 im Sternbild Orion wird auch Flammennebel genannt und befindet sich in der Nähe des linken Gürtelsterns. Junge Sterne in dieser Region ionisieren das Wasserstoffgas und regen ihn zum Leuchten an. Aus den bereits zuvor genannten Gründen kann der Flammennebel im NIR nur eingeschränkt beobachtet und untersucht werden. Dennoch ist bereits die Kartierung des ionisierten atomaren Wasserstoffs (H) im Lichte von dessen Paschen-Alpha-Emissionslinie bei $1,87\ \mu\text{m}$ möglich. Dabei kommen die Schmalbandfilter von FLITECAM zum Einsatz. Abbildung 6.37 rechts zeigt das im Lichte der $\text{Pa } \alpha$ Emissionslinie leuchtende atomare Gas in dem Gebiet. Außer der Gasemission der

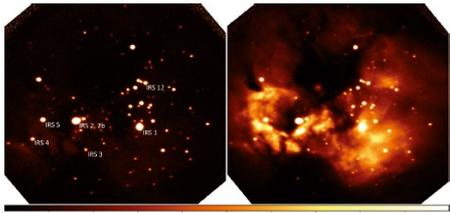


Abbildung 6.37: Links: NGC 2024, abgebildet in einem sehr schmalen Band bei $1,90\ \mu\text{m}$, das die Emission der Paschen-Alpha-Linie des Wasserstoffs bei $1,87\ \mu\text{m}$ nicht enthält. Rechts: Dasselbe Sternfeld, beobachtet in dem schmalen Band, das auf die Paschen-Alpha-Linie zentriert ist. Die Differenz zwischen beiden Bildern zeigt dann die reine Emission des Wasserstoffs, soweit diese bereits im NIR zugänglich ist. Die dunklen Flecke im rechten Bild deuten auf weitere hochextinguierte und tieferliegende Gebiete hin, die erst im FIR untersucht werden können. Das Bild zeigt nur einen sehr kleinen Ausschnitt von Abbildung 6.34. © I. McLean

Paschen-Alpha-Emissionslinie sind in dem sehr schmalen Wellenlängenbereich des Filters natürlich auch Sterne und leuchtender heißer Staub zu sehen, die auf und auch weit neben der Wellenlänge des Wasserstoffs leuchten. Das linke Bild wurde mit einem gleichbreiten Schmalbandfilter aufgenommen, das spektral neben der Wasserstoff Emissionslinie platziert wurde. Die Differenz beider Bilder würde dann allein die Gasemission zeigen. Die Struktur der

Gasemission im rechten Bild zeigt aber bereits auch so, dass vieles von der Linienemission durch Vordergrundwolken absorbiert wird und einer Energiebilanzierung nicht zugänglich ist. Es braucht eben die FIR Beobachtungen, um hier ein vollständiges Bild zu erhalten [50].

6.5.3 | FORCAST und
FIFI-LS: M17

Randolf Klein

Der Omega-Nebel, auch bekannt als Messier 17 oder kurz M17, ist eine viel untersuchte Sternentstehungsregion im Sternbild Schütze und steht in einer Distanz von ungefähr 6000 Lichtjahre zur Erde. Aus Gas und Staub sind dort vor weniger als einer Million Jahren rund 100 OB-Sterne entstanden, das heißt Sterne mit mehr als der doppelten Masse unserer Sonne. Die massenreichsten Sterne in M17 erreichen sogar das 60-fache der Sonnenmasse und damit die fast 800.000-fache Leuchtkraft der Sonne. Die enorme Strahlung dieser jungen Sterne hat die Gaswolke, aus denen die Sterne entstanden sind, schon fast in zwei Teile zerrissen. Das lässt sich gut in dem FORCAST-Bild von M17 (Abb. 6.38) erkennen. Die jungen Sterne in der Mitte des Bildes haben mit ihrer Strahlung Gas und Staub zerstört und weggeblasen, aber es ist noch an der rechten und oberen Seite des Bildes molekulares Gas und darin eingebetteter Staub vorhanden. FORCAST kann die Wärmestrahlung des von der Sternenstrahlung aufgeheizten Staubes registrieren. Sie ist im Bild gelb-rot dargestellt.

Mit FIFI-LS haben wir die Struktur der eingerahmten Region rechts im Bild untersucht, indem wir dort die Intensitäten einiger interessanter Spektrallinien vermessen haben [51]. In diesem Bereich trifft die UV-Strahlung der massiven Sterne von schräg links oben auf das dort vorhandene dichte Gas und den darin eingebetteten Staub. Das Besondere an dieser Region besteht darin, dass das verbliebene Gas eine relativ glatte Wand bildet, an der wir etwa tangential entlang sehen. Die gemessenen Intensitäten sind in der eingesetzten Karte und der nächsten Abbildung 6.39 gezeigt. In ihr wurde die Karte so gedreht, dass die UV-Strahlung von oben auf die dichte Gasschicht trifft.

In dieser Abbildung sind deutlich zwei Bereiche zu sehen, die sich kaum überlappen. Im unteren Teil der Karte hat FIFI-LS starke Emissionen von einfach ionisiertem Kohlenstoff

6.5 | Galaktische Sternentstehung

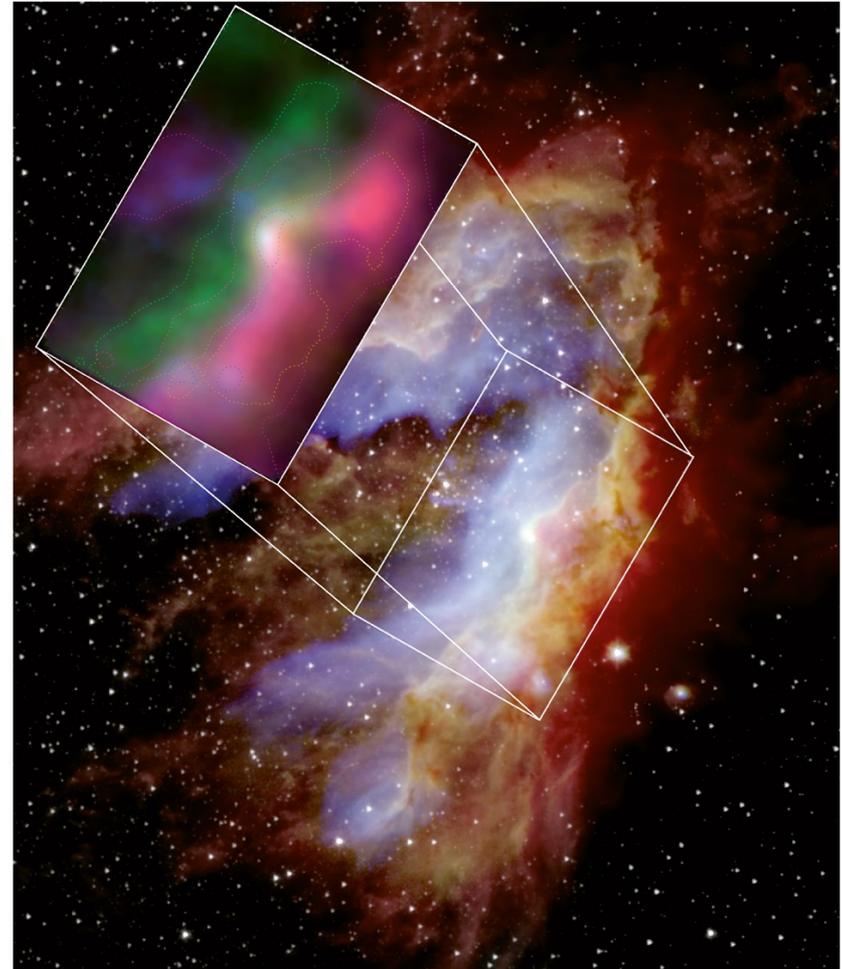
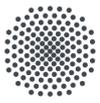


Abbildung 6.38 Übersicht über M17. Komposittbild: Hintergrund ($3,6\ \mu\text{m}$ – weiß, $20\ \mu\text{m}$ – blau, $37\ \mu\text{m}$ – grün, $70\ \mu\text{m}$ – rot) © xxx et al [49]. Der Kasten zeigt die von FIFI-LS beobachtete Region und der Einsatz die im Text beschriebene FIFI-LS Karte (vergleiche auch Abb. 6.39). © Komposition: R. Klein



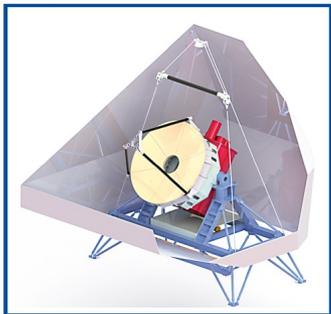
7 | Rückblick und Ausblick



Abbildung 79:
Der leichtgewichtete ASTHROS Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 2,5 m während der Integration. Gut erkennbar sind die Einzelsegmente des Spiegels.
© NASA, Media Lario

schobene [CII]-Linie bei $158 \mu\text{m}$ über den Rotverschiebungsbereich $0,5 < z < 1,7$ beobachten, um die Geschichte der Sternentstehung im frühen Universum zu verfolgen. TIM besteht aus einem 2-Meter-Teleskop mit zwei Czerny-Turner-Gitterspektrometern, die den Wellenlängenbereich von 240 bis $420 \mu\text{m}$ mit einer spektralen Auflösung von $R=250$ abdecken. Das Instrument verfügt über 7200 neuartigen Detektorpixel (Aluminium-Kinetik-Inductance-Detectors, AI-KID) in zwei Wellenlängenkanälen. Die wissenschaftliche Mission von TIM ist als Langzeitflug (zwei Wochen oder länger) in der Antarktis für Dezember 2026 geplant. Ein erster Testflug in Fort Sumner, New Mexico, ist derzeit für Herbst 2024 geplant. [6]

Abbildung 710: Das Design der Gondel des Terahertz Intensity Mappers TIM. Der Spiegeldurchmesser beträgt 2 m , die Höhe der gesamten Gondel ca. $5,3 \text{ m}$.
© Joaquin Vieira, NASA



Das *EXperiment for Cryogenic Large-Aperture Intensity Mapping (EXCLAIM)*, PI Eric Switzer ist die zweite bevorstehende Mission zur Kartierung der Intensität von Spektrallinien. Ihr Ziel ist die Kartierung der rotverschobenen Emissionen von [CII] bei $158 \mu\text{m}$ und mehreren CO-Linien bei Rotverschiebungen von $z < 3,5$. Dieses Instrument verwendet Aluminium-Microwave-Kinetik-Inductance-Detectors, (AI-MKID). Allerdings arbeiten diese mit einem chip-basierten Rowland-Spektrometer und decken den Wellenlängenbereich von $555 \mu\text{m}$ bis $714 \mu\text{m}$ mit einer spektralen Auflösung von $R=512$ ab. Alle Optiken von EXCLAIM, einschließlich des $0,9\text{-m}$ -Primärspiegels, sind auf 5 K gekühlt. Die Detektoren sind auf 100 mK gekühlt. EXCLAIM bietet eine räumliche Auflösung von $4'$ und wird ein Feld von 305 Quadratgrad vermessen. Der wissenschaftliche Flug ist als konventioneller Ballonflug in Nordamerika (Fort Sumner oder Palästine, Texas) geplant, wobei ein erster technischer Flug von Fort Sumner nach derzeitiger Planung für 2025 vorgesehen ist.

Das *Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope Observatory (BLAST Observatory)* soll Weitwinkelbeobachtungen der polarisierten thermischen Emission von interstellarem Staub bei Wellenlängen von $175 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$ und $350 \mu\text{m}$ durchführen. Ein Off-Axis-Teleskop mit $1,8 \text{ m}$ Durchmesser wird mit 8274 polarisationsempfindlichen TiN-MKIDs ausgestattet sein, die bei 100 mK betrieben werden und auf die drei Wellenlängenkanäle verteilt sind. Unter Ausnutzung des geringen Hintergrunds und der breiten Spektralbänder, die in Ballonhöhe erreicht werden können, würde das BLAST-Observatorium bei vergleichbaren Wellenlängen eine Verbesserung der Kartierungsgeschwindigkeit um vier Größenordnungen gegenüber HAWC+ bzw. um drei Größenordnungen gegenüber CCAT-prime bieten. Das BLAST Observatory ist für einen mehr als 30 Tage dauernden Flug unter einem Druckballon ausgelegt, der von Wanaka, Neuseeland, aus starten soll. Ein Flugdatum war zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht bekannt.

Auch wenn die Realisierung mancher oder aller dieser Projekte einiges von dem abdeckt, was SOFIA als Observatorium geleistet hat, sind die vorgestellten geplanten Missionen doch in unterschiedlichem Maße auf spezielle

7.4 | Gegenwärtige und künftige Plattformen

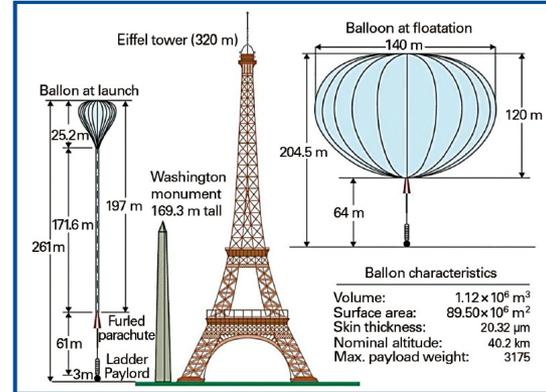


Abbildung 711: Stratosphärenballons haben eine beeindruckende Größe. Einige Details sind in diesem Bild erläutert.
© NASA [7], Maryam Rahmani

Forschungszwecke hin optimiert und stellen außerdem nur den beteiligten Institutionen zur Verfügung. Sie sind keine Langzeitprojekte und kein „Gemeinschaftsobservatorium“ wie SOFIA es war. Insofern sind sie kein Ersatz für ein Observatorium wie SOFIA, das der natio-

Europäische Ballonaktivitäten sind vor allem in Frankreich zu finden, die dort etwa unter dem Kürzel HAPS (*High Altitude Pseudo Satellite*) firmieren. Alle diese Projekte sind allerdings eher Leichtgewichte: STRATOBUS [8] ist ein unbemanntes solarantriebenes

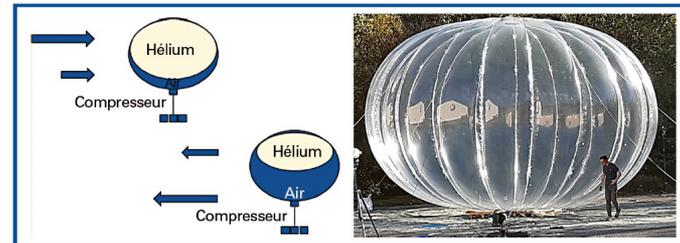


Abbildung 712: Links: Das Konzept eines höhensteuerbaren Ballons basiert auf einem Ballon im Ballon. Der innere heliumgefüllte Ballon wird von einem luftgefüllten Ballon umgeben. Die Erhöhung oder Verringerung des Gasdrucks im äußeren Ballon verändert dessen Auftrieb, wodurch sich die Flughöhe steuern lässt. Da die Winde in unterschiedlichen Höhen in verschiedene Richtungen wehen, kann auf diese Weise ein gewisse Ortstreuigkeit des Ballons erreicht werden. Rechts ein solcher Doppelballon in der Erprobung. © Dubourg et al. 2023 [11]

nalen oder internationalen Community frei zur Verfügung stand und flexibel eingesetzt werden konnte. Auch sind alle diese vorgestellten Projekte und Vorschläge im wesentlichen US-basierte Unternehmungen, an denen europäische Forschende nur im Falle einer eventuellen Kollaboration beteiligt sein können.

steuerbares Luftschiff mit einer Nutzlast von ca. 250 kg , Airbus Zephyr ist eine unbemannte Drohne mit Flughöhen von bis zu 15 km Höhe [9] und unter dem Namen HEMERIA wird ein lenkbarer Ballon entwickelt [10] (Abb. 7.12). In Europa führt Schweden über die Swedish Space Corporation (SSC) in Kiruna Flüge mit

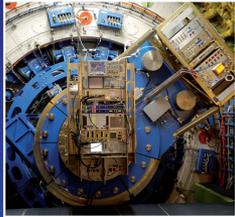


Liste der Anhänge

- A1 Optische Eigenschaften des SOFIA Teleskops
- A2 SOFIA Projektchronik
- A3 SOFIA Gremien
- A4 Leitendes SOFIA Personal
- A5 Deutsche *Calls for Proposal, Time Allocation Committes (TACs)*
- A6 Empfohlene Beobachtungsanträge
- A7 Angenommene Anträge zu *Impact* und *Legacy* Programmen
- A8 Liste der SOFIA Expeditionen
- A9 Legende der Bilder zu VIP Besuchern bei SOFIA
- A10 Legende der Bilder zu Lehrermitflügen bei SOFIA
- A11 Autoren Verzeichnis
- A12 Glossar
- A13 Abkürzungen
- A14 Literaturliste

52 Autoren, ≤ 500 Seiten, ≈ 470 Bilder

Dateiname: Umschlag_Version_16



Warum haben die NASA und das DLR – die amerikanische und deutsche Raumfahrtagentur – eine fliegende Sternwarte betrieben? Mit welchen Tricks haben Ingenieure und Ingenieurinnen das Teleskop des Stratosphären Observatoriums Für Infrarot Astronomie (SOFIA) stabilisiert? Was ist am infraroten Universum so interessant? Wozu hatte die Universität Stuttgart eine Außenstelle in Kalifornien? Welche Rolle spielte die deutsche Wiedervereinigung während der Entwicklungsphase? Diese und viele weitere Fragen rund um die fliegende Sternwarte SOFIA beantwortet dieses von Insidern geschriebene Buch in Bildern und Texten. Lassen Sie sich auf einen Forschungsflug an Bord des einzigartigen Observatoriums mitnehmen, gewinnen Sie einen Überblick über die wissenschaftlichen Errungenschaften des Observatoriums und fragen Sie: Wie könnte das nächste Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie aussehen? Was Sie schon immer über SOFIA wissen wollten, finden Sie in diesem Buch.

SOFIA Mission infrarotes Universum

SOFIA

Mission infrarotes Universum



Universität Stuttgart



Deutsches SOFIA Institut



Institut für Raumfahrtssysteme





Universität Stuttgart

Institut für Raumfahrtssysteme (IRS)



Preise



Preise

2. Platz **Karsten Schindler**

Thema: Die Bodenanlage in der Sierra Nevada



Preise

2. Platz **Karsten Schindler**

Thema: Die Bodenanlage in der Sierra Nevada

1. Platz **Jörg Wagner**

Thema: Gyroskope



SOFIA Buch Eintragen in die Liste
Fotoheft hier mitnehmen

Danke

