Folien für den Astronomie- und Physikunterricht

Übersicht:

1. Flugzeug für SOFIA: eine gebrauchte Boeing 747 SP
2. Fertiges Flugzeugobservatorium SOFIA (künstlerische Darstellung)
3. Querschnitt durch den Teleskopbereich
4. Einblick in den Flugzeugrumpf
5. Rohling für den SOFIA-Hauptspiegel
6. Leichtgewichteter Hauptspiegel
7. Transmission der Erdatmosphäre
8. Hauswand im sichtbaren und infraroten Licht
9. Sternbild Orion im sichtbaren und infraroten Licht
10. Stern Beta Pictoris mit Staubscheibe im infraroten Licht
11. Uranus: Erste Messung der Ringe und optische Aufnahme des Planeten mit Ringsystem
12. Darstellung der Sternbedeckung durch Uranus

Juni 2000, Dr. Ruth Titz, DLR, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Berlin

Folie 1
Information: Flugzeug

Die Plattform für SOFIA ist ein gebrauchtes Passagierflugzeug, das 1977 fertiggestellt und bei verschiedenen Luftfahrtgesellschaften eingesetzt wurde. Es ist eine Boeing 747 SP, eine verkürzte Version des Jumbo-Jets, die speziell für Langstreckenflüge gebaut wurde. Das Flugzeug ist knapp 60 m lang, die Spannweite beträgt 56 m.
1997 wurde dieses Flugzeug von der NASA, der Raumfahrtbehörde der USA, gekauft. In ihrem Auftrag arbeitet eine Firma in Texas/USA daran, das Passagierflugzeug in das Forschungsflugzeug SOFIA zu verwandeln: alle Sitze müssen herausgenommen, neue Querwände eingesetzt, Versorgungsleitungen neu gelegt werden. Der gravierendste Eingriff ist eine Öffnung im hinteren Teil des Rumpfs (schwarze Markierung), durch die ein Teleskop ohne Schutz ungehindert ins Weltall schauen kann.
Das Flugzeug ist regelmäßig gewartet worden und hat nur relativ wenige Starts und Landungen vollzogen. Nach eingehender Überprüfung sind die Ingenieure davon überzeugt, daß dieses Flugzeug über die geplante Laufzeit von 20 Jahren einsatzbereit sein wird.

Kann ein Flugzeug mit einer Öffnung im Rumpf überhaupt fliegen?

Die Öffnung von ca. 3m x 3m ist eine enorme Störung für die am Rumpf entlanglaufenden Luftströmungen. Um den Strömungswiderstand so klein wie möglich zu halten, sollten die Stromlinien, die den Weg der Luftteilchen darstellen, möglichst glatt und gleichmäßig sein (laminare Strömung). Die Öffnung im Flugzeugrumpf stört den Weg der vorbeiströmenden Luftteilchen. Es kommt zu Verwirbelungen und Turbulenzen, die unerwünschte wechselnde Kräfte auf das Flugzeug ausüben. Die Flugeigenschaften verändern sich. Ein ähnliches Problem tritt auf, wenn man mit dem Auto fährt und das Seitenfenster öffnet.
Solche Probleme untersucht man mit einem verkleinerten Modell in einem Windkanal. Druckempfindliche Sensoren oder Folien zeigen die auftretenden Kräfte an. Durch diese Versuche hat man herausgefunden, an welcher Stelle die Teleskopöffnung am wenigsten stört und wie der Rand der Öffnung beschaffen sein muß.

Themen im Unterricht: Physik
- laminare und turbulente Strömungen
- Windkanalversuche als Beispiel für eine Methode des Erkenntnisgewinns, wo direkte Experimente am Objekt nicht möglich sind.

Folie 2
Information: Flugzeugobservatorium

SOFIA ist ein Observatorium, das von Bord eines Flugzeugs aus betrieben werden wird. In den hinteren linken Teil des Rumpfs wird ein Teleskop eingebaut, das während des Fluges Sterne und andere astronomische Objekte beobachten kann. Im Gegensatz zu einem erdgebundenen Teleskop kann ein Flugzeugobservatorium nahezu alle Punkte über der Erde anfliegen und von dort Beobachtungen machen. Die nördliche Hemisphäre ist vom Heimatflughafen in Kalifornien zu erreichen, die südliche Hemisphäre kann durch regelmäßige Flüge von Neuseeland aus erreicht werden. Vorübergehende astronomische Ereignisse wie eine Sternbedeckung oder ein Komet sind für ein Flugzeugobservatorium besonders geeignete Beobachtungsobjekte. Ein Beobachtungsflug dauert zwischen sieben und acht Stunden. Da das Flugzeug normalerweise zu seinem Startflughafen zurückkehren muß, kann man ein astronomisches Objekt höchstens 3,5 Stunden lang beobachten.

Die Teleskopkabine ist während der Starts und Landungen durch eine Tür verschlossen und wird erst in einer bestimmten Höhe geöffnet. Dann ist das Teleskop den Umgebungsbedingungen ausgesetzt. In einer Höhe von 13 km beträgt die Temperatur ungefähr –50° Celsius, der Luftdruck ist auf ca. ein Fünftel des Luftdrucks auf Meeresniveau abgefallen (≈ 200 mbar).

SOFIA wird gemeinsam von den beiden Raumfahrtagenturen NASA (USA) und DLR (Deutschland) gebaut und betrieben. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist dabei verantwortlich für das komplette Teleskop, das in das umgestaltete Flugzeug eingebaut werden wird. Erste Flüge sind für das Jahr 2002 geplant.

Folie 3
Information: Teleskop und Strahlengang

Das SOFIA-Teleskop ist ein Spiegelfernrohr, das aus drei Spiegeln besteht, dem Haupt- oder Primärspiegel (Durchmesser: 2,7 m), dem Sekundärspiegel (Durchmesser: 35 cm) und dem Tertiärspiegel.

Der Strahlengang des einfallenden Lichts (alle Wellenlängen!) ist rot eingezeichnet. Zuerst fällt das Licht auf den parabolischen konkaven Primärspiegel (Brennweite: 3,2 m). Bevor es sich im Brennpunkt sammeln kann, trifft es auf den hyperbolischen konvexen Sekundärspiegel, der die Brennweite verlängert. Der Tertiärspiegel ist ein halbdurchlässiger Planspiegel, der den Strahl in den sichtbaren (grün) und in den infraroten Teil (rot) aufspaltet und ihn um 90° in die Passagierkabine umlenkt. Das sichtbare Licht wird einer Kamera zugeführt, die der Orientierung am Himmel und der präzisen Nachführung dient.

Die für SOFIA gewählte Strahlführung ist bei modernen Teleskopen sehr gebräuchlich (Cassegrain-Teleskop in Nasmyth-Anordnung). Sie erlaubt große und schwere Beobachtungsinstrumente anzubringen, ohne den Strahlengang abzuschatten. Bei SOFIA ermöglicht dieser Strahlengang den mitfliegenden Wissenschaftlern, bei normalem Druck und normaler Temperatur das Instrument in der Passagierkabine zu bedienen. Das Teleskop jedoch ist den Umgebungsbedingungen bei der Flughöhe ausgesetzt und kann das Licht von astronomischen Objekten unbehindert von störendem Wasserdampf sammeln.

Das Spiegelsystem und das wissenschaftliche Instrument werden gemeinsam bewegt. Sie bilden zusammen mit dem Nasmyth-Fokus eine Art Hantel, die um ihren Griff herum gedreht werden kann. Das Teleskop kann so zwischen 20° und 60° zur Horizontalen aus dem Flugzeug herausschauen.

Themen im Unterricht: Physik
- optische Abbildungen
- Reflektoren und Refraktoren
- Gesichtsfeld und optische Auflösung

Folie 4
Information: Arbeitsplatz Jumbo-Jet

Das fertige Flugzeugobservatorium SOFIA bietet Arbeitsplätze für Wissenschaftler und Teleskopoperateure im mittleren Bereich des Flugzeugs. Dort sind Konsolen installiert, die Rechner, Bildschirme und Meßgeräte enthalten, um das Teleskop in die gewünschte Position zu bringen, das wissenschaftliche Instrument am Teleskop zu steuern und die Daten aufzunehmen. Im vorderen Teil sind Sitzplätze für Gäste vorgesehen, die über multimediale Technik das Geschehen am Teleskop und die Messungen verfolgen können. Gäste werden u. a. Lehrer, Politiker und Wissenschaftsjournalisten sein. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Fortbildung für Lehrer, die damit eine einmalige Chance erhalten Wissenschaft live zu erleben und die Erfahrungen in ihre Unterrichtsgestaltung einzubringen.

Der hintere Bereich des Flugzeugs ist vom übrigen Innenraum durch eine Druckwand getrennt. Hier befindet sich die Kabine mit dem Teleskop und die notwendige Klimaanlage. Die Klimaanlage kühlt das Teleskop bereits vor dem Start herunter, damit die Anpassung an niedrigen Temperaturen in der Stratosphäre nicht zu lange dauert. Vor der Landung wird gasförmiger Stickstoff in die Kabine geleitet, um die Kondensation von Wasser in der "normalen" Luft auf den eiskalten Spiegeln zu verhindern.

Wie kann ein Teleskop in einem Flugzeug arbeiten?

Der Einsatz in einem Flugzeug bedeutet erhöhte Anforderungen an das Teleskop. Es ist eine sehr laute und vibrierende Umgebung. Will man das Teleskop auf einen gewünschten Punkt am Himmel schauen lassen, dann müssen alle Abweichungen vermieden oder sofort ausgeglichen werden.
Zunächst einmal gibt es die Vibrationen der Triebwerke. Diese Bewegungen werden durch ein Stoßdämpfer-System (Vibrations-Rotations-Isolation, siehe auch Folie 3) vom Teleskop ferngehalten. Die in der Regel relativ langsame Bewegungen des Flugzeugs (Roll- und Nickbewegungen) übertragen sich nicht auf das Teleskop, das durch einen Laser-Kreisel stabilisiert ist und seine Stellung im Raum beibehält. Negativen Einfluß haben vor allen Dingen die Luftströmungen, die in die offene Teleskopkabine einfallen. Sie üben Kräfte auf das Teleskop aus, die es zu Eigenschwingungen anregen oder von seiner gewünschten Lage ablenken. Die Anregung von Eigenschwingungen kann man weitgehend durch eine Struktur vermeiden, deren Eigenresonanz sehr hoch liegt. Die restlichen Bewegungen werden durch ein komplexes Nachführsystem ausgeglichen, das von einer Nachführkamera Informationen über die tatsächliche Ausrichtung bekommt, mit der gewünschten Ausrichtung vergleicht und im Bruchteil einer Sekunde mit Motoren an der Achse nachregelt.

Themen im Unterricht: Physik
- Resonanzeffekte, Eigenschwingungen
- Rückkopplung

Folie 5
Information: Wie baut man ein Teleskop für das Flugzeug?

Ein flugzeuggetragenes Teleskop, das bei den Umweltbedingungen von ca. 13 km Flughöhe arbeiten soll, stellt hohe Anforderungen bei der Herstellung.

Der größte Bauteil des gesamten Teleskops ist der Primär- oder Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 2,7 m. Er besteht aus Zerodur, einer Glaskeramik, die dem Material der Ceran-Kochfelder in einer modernen Küche ähnelt. Glaskeramik ist ein Stoff, der aus kristallinen und amorphen Bestandteilen zusammengesetzt ist. Das Mischungsverhältnis der beiden Bestandteile bestimmt den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Temperaturdifferenz, der das Teleskop ausgesetzt ist, kann im ungünstigen Fall 100° Celsius betragen (Temperatur am Boden in der kalifornischen Wüste: + 40° C, Temperatur in der Stratosphäre bis zu –60° C). Diese Temperaturschwankungen sollen aber die Form des Spiegels nicht verändern. Das Material Zerodur, das von der Firma Schott in Mainz hergestellt wird und für den SOFIA-Hauptspiegel und andere Teleskope verwendet wird, hat einen extrem kleinen Längenausdehnungskoeffizienten.

Themen für den Unterricht: Physik, Mittelstufe

- Versetze Dich in die Rolle des Chefingenieurs für das SOFIA-Teleskop: Welche Eigenschaften muß das Material des Hauptspiegels haben? Schwer oder leicht? Weich oder hart? Empfindlich oder unempfindlich gegen Temperaturänderungen?

- Vergleiche die Längenausdehnung bei Temperaturänderungen für verschiedene Materialien. Allgemein gilt: $\Delta\lambda = \alpha \cdot \lambda \cdot \Delta\Theta$, wobei $\Delta\lambda$ die Längenänderung ist, die ein Körper der Länge l bei Temperaturänderung $\Delta\Theta$ erfährt. Errechne für die drei Materialien $\Delta\lambda$ aus bei einer Temperaturänderung von $\Delta\Theta$=100°C und einer Ausgangslänge λ= 2,7 m.

Material	**Längenausdehnungskoeffizient α (Einheit: 1/grd)**
Eisen	$.12 \cdot 10^{-6}$
Quarzglas	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Zerodur	$0,02 \cdot 10^{-6}$

Folie 6
Information: Wie baut man ein Teleskop für das Flugzeug?

Der Rohling aus Zerodur mit einer Bohrung für die Halterung des Tertiärspiegels wog nahezu 4 t. Das war zu schwer, denn jedes zusätzliche Gewicht im Flugzeug verringert die Flugzeit und die maximal erreichbare Flughöhe. Zur Gewichtseinsparung wurde daher in die Rückseite des Rohlings 120 Sacklöcher eingefräst. So entstand eine leichte honigwabenartige, aber doch feste Struktur. Der Spiegel wiegt jetzt 880 kg. Er muß noch geschliffen und poliert werden. Zuletzt erhält er eine Goldbeschichtung, damit die einfallende Strahlung zu fast 100% reflektiert wird.

Die Teleskopstruktur, die den Spiegel trägt, ist aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, ein leichtes, aber sehr festes Material. Das komplette Teleskop wird ca. 18 t wiegen. Zum Vergleich: das Teleskop des Max-Planck-Instituts für Astronomie auf dem Calar Alto, Spanien, mit einem Hauptspiegel von 2,2 m Durchmesser wiegt 110 t, die beweglichen Teile wiegen alleine 71 t.

Folie 7
Warum gehen Astronomen in die Luft?

Die klassische Astronomie beobachtet im sichtbaren Licht. Das elektromagnetische Spektrum umfaßt aber auch kürzere und längere Wellenlängen. Astronomische Objekte strahlen in allen Wellenlängen Energie ab. Jeder Wellenlängenbereich erschließt verschiedene Eigenschaften. Der Infrarot-Wellenlängenbereich (λ = 750 nm bis 1000 µm) ist in ausgezeichneter Weise geeignet, kühlere Objekte zu beobachten oder das Vorkommen verschiedener Atom- oder Molekülsorten in interstellaren Wolken nachzuweisen.
Beobachtungen im gesamten infrarote Wellenlängenbereich sind vom Erdboden aus nicht möglich. In den unteren Kilometern der Erdatmosphäre ist so viel absorbierender Wasserdampf vorhanden, daß infrarote Strahlung aus dem Weltall Meeresniveau nicht erreicht.
Ein erster Ausweg waren Teleskope an sehr hochgelegenen und trockenen Orten, z. B. in der chilenischen Atakama-Wüste auf 2000 m Höhe oder auf den erloschenen Vulkankegeln von Hawaii in 4200 m. Verschlossen blieb dabei immer noch der Wellenlängenbereich zwischen 30 µm und 300 µm. Astronomische Messungen in diesem Infrarot-Bereich sind erst oberhalb der Tropopause möglich, die je nach Wetterlage und Breitengrad in 10 bis 15 km Höhe liegt. Hat man die Stratosphäre erreicht, dann liegt 99% des Wasserdampfs der gesamten Atmosphäre unterhalb der Flughöhe.

Folie 8
Mit Infrarot-Augen sehen

Mit unseren Augen nehmen wir nur Licht aus einem sehr schmalen Bereich des elektromagnetischen Spektrums wahr und erhalten auch nur die Informationen, die mit diesem Licht transportiert werden. Eine sehr heiße Herdplatte können wir an ihrer gelb-roten Farbe erkennen, unsere Augen sind jedoch nicht geeignet, die Temperatur eines nur warmen Körpers zu erfassen. Anders wäre es, wenn unsere Augen auf die Infrarot-Strahlung empfindlich wären, die sich im elektromagnetischen Spektrum an das rote Licht anschließt und an der man die Temperatur eines Körpers erkennen kann.
Auf der Folie sind zwei Bilder einer Hauswand zu sehen, das linke wurde mit einer normalen Kamera aufgenommen, das rechte mit einer Thermographiekamera, die die infrarote Strahlung aufzeichnet. In dieser Hauswand sind zwei Fenster und eine zugemauerte und verputzte Fensteröffnung. Auf dem Foto (links) kann man nur die beiden Fenster erkennen. Im infraroten Licht erscheint daneben noch die zugemauerte und verputzte Fensteröffnung (rechtes Bild, Mitte), die sehr viel mehr Infrarotstrahlung aus dem Inneren nach draußen treten läßt als die restliche Wand.

Folie 9
Astronomie im Infraroten

Das Sternbild Orion ist durch die drei Gürtelsterne leicht am Winterhimmel zu finden. Für unser Augen oder mit einem optischen Teleskop sieht es so aus, als ob dieser Himmelsbereich nur aus einigen leuchtenden Sternen oder Flecken bestehen würde. Im infraroten Licht leuchtet aber der gesamte Bereich und zeigt eine wolkenartige großräumige Struktur.
Weitere Analysen und Messungen haben gezeigt, daß es sich bei dieser Region um eine riesige Gas- und Molekülwolke handelt. In der Wolke gibt es einige extrem heiße Punkte, an denen sich das Gas verdichtet und erwärmt. Diese heißen und verdichteten Stellen sind die Geburtsstätten neuer Sterne. Das sichtbare Licht, das die jungen Sterne ausstrahlen, kann die Hülle aus Gas und Staub nicht durchdringen. Für Infrarotstrahlung ist das jedoch kein Hindernis. Dieser Wellenlängenbereich ist daher ideal, um Vorgänge im Inneren einer Staubwolke zu beobachten. Nicht nur die Entstehung von Sternen findet im Inneren einer Staubwolke statt, auch die Vorgänge um das Schwarze Loch im Zentrum unseres Milchstraße sind durch Staub verhüllt.

Folie 10
Wie entsteht ein Planet?

Unser Planetensystem ist keine einmaliges und zufälliges Erscheinung. Um andere Sonnen kreisen sehr wahrscheinlich ebenfalls Planeten. Unsere Beobachtungstechniken reichen jedoch noch nicht aus, um einen Planeten direkt nachzuweisen.
Nach heutigem Stand des Wissens entsteht ein Stern und das ihn umgebende Planetensystem aus einer rotierenden Gas- und Staubscheibe. Diese Entwicklung können wir nicht direkt beobachten, aber wir können an verschiedenen Sternen Momentaufnahmen dieser Entwicklungsstufen beobachten.
Ein Beispiel dafür ist die Umgebung des Sterns Beta Pictoris, hier in einer Aufnahme mit dem 3,6 m Teleskop in Chile (Quelle: ESO, 1996). Der Stern selbst ist abgedeckt. Aus der im infraroten leuchtenden Staubscheibe wird sich vermutlich ein Planetensystem mit einem Riesenplaneten, wie z. B. Jupiter, entwickeln.

Folie 11
Entdeckung der Ringe um Uranus mit einem Flugzeugobservatorium

Die Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn kannten die Menschen schon im Altertum. Uranus hingegen wurde erst im Jahre 1781 von Friedrich Wilhelm Herschel entdeckt. Mit bloßem Auge kann man den Planeten noch gerade erkennen, wenn man sein Position am Himmel kennt.
Lange Zeit wußte man außer Masse, Umlaufzeit und Entfernung von der Sonne keine weiteren Einzelheiten. Eine Sensation war daher die Entdeckung der Uranus-Ringe im Jahr 1977 mit dem Flugzeugobservatorium KAO, dem Vorgänger von SOFIA. Bis dahin glaubte man, daß nur Saturn ein Ringsystem hätte.
Die Entdeckung erfolgte während einer Sternbedeckung: der Fixstern SAO 158687 im Sternbild Schwan (südliche Hemisphäre) wurde durch Uranus abgedeckt. Mit dem Flugzeug als Plattform für das Teleskop konnte man den Bereich des Sternschattens, der im Indischen Ozean lag, anfliegen. Der Stern wurde bereits deutlich vor und nach dem Durchgang des eigentlichen Planetenkörpers verdunkelt: ein starker Hinweis auf ein Ringsystem.

Links: Die Abbildung aus der ersten Veröffentlichung von J. L. Elliot et al. (Nature Vol. 267, May 1977) zeigt die Intensität des Sternenlichts in Abhängigkeit von der Zeit. Im oberen Teil der Abbildung läuft die Zeitskala von rechts nach links, in der unteren Teil von links nach rechts. Der äußere Ring des Uranus (in der Abbildung die Markierung "ε") dunkelte das Sternlicht zum ersten Mal um 20.12 Uhr ab, zum letzten Mal um 21.54 Uhr. Die gesamte Bedeckung dauerte also in etwa eine Dreiviertelstunde.

Rechts: Der Planet Uranus und sein Ringsystem, aufgenommen mit einer Kamera des Hubble-Weltraumteleskops im Juli 1995.

Folie 12
Sternbedeckung durch den Planeten Uranus

In Analogie zu einer Sonnenfinsternis ist eine Sternbedeckung eine Konstellation, bei der sich ein Planet in die Sichtlinie zwischen einem Stern und der Erde schiebt. Der Stern ist für einige Zeit nicht von der Erde aus zu sehen. Eine Sternfinsternis kann von bestimmten Regionen auf der Erde beobachtet werden, die geometrischen Bedingungen erfüllen. Durch die Bewegung der Erde um die Sonne ist diese Konstellation aber nur für kurze Zeit erfüllt.
Im März 1977 trat eine Sternbedeckung des Sterns SAO 158687 auf. Bei der Beobachtung der Sternfinsternis durch Uranus fiel der Kernschatten auf ein Gebiet im Indischen Ozean. Nur mit einem flugzeuggetragenen Teleskop Plattform konnte diese astronomischen Beobachtungen in ihrem vollen Verlauf beobachtet werden. Dabei zeigt die Messung eine Abnahme des Sternenlichts bevor und nachdem die Planetenscheibe den Stern bedeckte.

Dieses Material wurde Ihnen überreicht durch das SOFIA-Projektbüro. Es ist zur Verwendung im Unterricht gedacht. Eine weitergehende Nutzung ist nur in Absprache möglich.

Bitte wenden Sie sich an:

Dr. Ruth Titz
SOFIA-Projekt-Büro
DLR, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung
Rutherfordstr. 2
12489 Berlin
Tel/Fax: 030 670 55 593/567

weiterführende Informationen

im Internet:
http://www.dlr.de/SOFIA
http://www.sofia.arc.nasa.gov

in Zeitschriften:

Olaf Fischer, Ruth Titz
SOFIA: ein Projekt für Forschung und Bildung
Astronomie + Raumfahrt im Unterricht
Heft 5/1999

Alfred Krabbe, Ruth Titz, Hans-Peter Röser
SOFIA oder: Warum Astronomen in die Luft gehen
Sterne und Weltraum
Heft 12/1999

Detlef Karstädt, Klaus-Peter Möllmann, Frank Pinno, Michael Vollmer
Sehen im Infrarot – Grundlagen und Anwendungen der Thermographie
Physik in unserer Zeit
Heft 1/1998