

SOFIAs unsichtbares Weltall Handbuch zum Infrarotkoffer für die Schule mit Experimenten zum selber durchführen



in Kooperation mit dem WiS!-Projekt am Haus der Astronomie

Dr. Cecilia Scorza (DSI)



Dr. Olaf Fischer (WiS)



Übersicht des Koffers 1



- 1 Webcam, Infrarotstrahler
- 2 Prisma und NIR-Indikatorkarten
- 3 Aktivlautsprecher und Solarzelle
- 4 Rotlichtlampe, Alu-Platte (matt), Spiegel und Metallspiegel
- 5 Fernbedienung, Modell zum Wassermolekül
- 6 Handspektroskop, Gummi-Bälle, schwarze Plastiktüte

Übersicht des Koffers 2



- 7 Spektrino-Modell
- 8 3 Thermometer für den Herschelversuch
- 9 Dunkelwolken-Modell

Farbkodierung im Handbuch

Das vorliegende Handbuch beinhaltet die theoretischen Grundlagen zum Thema Infrarotstrahlung angepasst an das Niveau der Mittel- bis Oberstufe. Um die Suche der astronomischen Themen und Aktivitäten für die Umsetzung im Unterricht zu erleichtern, wird im Handbuch die folgende Farbkodierung durchgehend verwendet:

Anwendungen in der Astronomie

Aktivitäten und Experimente

Inhalt

1. SOFIA, die fliegende Sternwarte	1
1.1 Die Entdeckung der Infrarotstrahlung und den langen Weg zur SOFIA Aktivität 1: Das Herschel Experiment selbst durchführen	2 5
2. Was ist die Infrarotstrahlung, was ist Licht überhaupt?	7
 2.1 Das Licht als Wellenphänomen: das elektromagnetische Spektrum 2.2 Die Wärmestrahlungsgesetze 2.3 Die IR-Strahlung als Teil des elektromagnetischen Spektrums Anwendung in der Astronomie 1: Sterne und die Strahlungsgesetze Aktivität 2: Das "Spektrino", ein Visualisierungsmodell zum Spektrum 	7 8 9 10 13
 3. Die Welt der Nahinfrarotstrahlung (NIR) Aktivität 3: Die Fernbedienung – ein NIR-Strahler im Wohnzimmer Aktivität 4: NIR-Licht hörbar machen Aktivität 5: Emission vom Licht und Termschema Aktivität 6: Eigenschaften der NIR-Strahlung - Reflexion Aktivität 7: Eigenschaften der NIR-Strahlung – Transmission und Absorption Anwendung in der Astronomie 2: Durch Staubwolken in der Galaxis sehen Aktivität 8: Das Dunkelwolkenmodell, Herstellung und Übungen Anwendung in der Astronomie 3: Die Masse Schwarzer Löcher 	14 14 15 16 17 18 19 20 25
 4. Die Welt des Mittleren Infraroten (MIR) und Ferninfraroten (FIR) 4.1 Wie funktionieren Thermografie-Kameras und ihre Anwendungen Aktivitäten 9: Die Emission von MIR-Strahlung Aktivitäten 10: Barriere für das Infrarote: Absorption in der Erdatmosphäre Anwendungen in der Astronomie 4: Die Strahlung kalter Objekte Auf der Suche nach jungen Sonnensystemen im MIR Kalte Objekte unseres Sonnensystems im MIR erforschen Aktivitäten 11: Das Holzkugelmodell der Erde Anwendungen in der Astronomie 5: Das Rätsel der Planetenatmosphären Im MIR nach extrasolaren Planeten suchen Astronomie im Fernen Infrarot (FIR): das Licht der kältesten Objekte Übersichtstabelle zur IR-Astronomie 	26 27 29 30 31 32 33 34 35 35 35 36 37
5. SOFIAs Herz: Das 17 Tonnen schwere Teleskop Aktivität 12: Reflektion von Wärmestrahlen Aktivität 13: Spiegelnde und diffuse Reflexion im MIR Aktivität 14: SOFIAs Vibrationen und was aus ihnen wird	38 39 40 41
6. Lösungen zu den Aktivitäten und Aufgaben	42
7. Literaturquellen und Kontakt	54

1. SOFIA, die fliegende Sternwarte

Am 26. Mai 2010 wurde ein neues Kapitel in der Astronomie- und Luftfahrtgeschichte geschrieben: Das bisher größte Flugzeugobservatorium der Welt mit einem Teleskopspiegel von 2,7 m Durchmesser an Bord ging an den Start. Mit dem **S**tratosphären **O**bservatorium für Infrarot **A**stronomie "**SOFIA**" sind Astronomen in der Lage, wichtige Hinweise über die Oberflächen von Kometen, Asteroiden, Monden und Planeten unseres Sonnensystems sowie über die chemische Zusammensetzung der Atmosphären extrasolarer Planeten zu erhalten. Auch die Entstehung und Entwicklung von Sternen, ferner Galaxien und die Rolle der Schwarzen Löcher bei der Entstehung von Galaxien zählen zu den Hauptforschungszielen dieses einzigartigen Projektes.



SOFIA, das Stratosphären Observatorium Für Infrarot Astronomie, ist ein Gemeinschaftsprojekt des Deutschen Zentrums für Luftund Raumfahrt e.V. (DLR) und der National Aeronautics and Space Administration (NASA). Es wird auf Veranlassung des DLR mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages und mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg und der Universität Stuttgart durchgeführt. Der wissenschaftliche Betrieb wird auf deutscher Seite vom Deutschen SOFIA Institut (DSI) der Universität Stuttgart koordiniert. auf

amerikanischer Seite von der Universities Space Research Association (USRA). Die Entwicklung der deutschen Instrumente wird von der Max-Planck-Gesselschaft (MPG) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert.

Die Infrarotstrahlung astronomischer Objekte kann vom Erdboden nur eingeschränkt empfangen werden, da insbesondere der Wasserdampf in der Erdatmosphäre diese Strahlung absorbiert. Jedoch, in SOFIAs Flughöhe von etwa 13 Kilometern ist diese Einschränkung nahezu aufgehoben und somit der Weg frei für die Beobachtung der infraroten Strahlung astronomischer Objekte.

Die Inhalte dieses Handbuches behandeln das unsichtbare infrarote Licht. Die astronomischen Phänomene werden im Zusammenhang mit Alltagsanwendungen der Infrarotstrahlung in Verbindung gebracht. Angefangen bei der Entdeckung der Infrarotstrahlung und ihrer physikalischen Beschreibung werden mögliche Sender und Empfänger sowie verschiedene Wechselwirkungen der IR-Strahlung mit der Materie vorgestellt. Experimente zum Selbermachen und schulgerechte Aufgaben ermöglichen die direkte Verankerung der Inhalte im Unterricht und in Schulprojekten.

1.1 Die Entdeckung der Infrarotstrahlung und den langen Weg zur SOFIA

Wie in vielen Fällen der Geschichte der Naturwissenschaften wurde die Infrarotstrahlung per Zufall entdeckt. Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822), ein deutscher Musiker aus Hannover, widmete seine Freizeit der Astronomie und stellte große Fernrohre her. Er untersuchte im Sommer des Jahres 1800 in England das Spektrum des Sonnenlichts, nicht ahnend, dass er kurz vor einer großen Entdeckung stand. Ihn interessierte der Zusammenhang zwischen der Spektralfarbe und der Wärmemenge, die jeder Spektralbereich abgibt. Dafür ließ er das Sonnenlicht durch einen Spalt auf ein Prisma fallen und maß die Temperatur im Licht der jeweiligen Farben in dem erzeugten Spektrum.

Eine Anekdote berichtet, dass Herschel seine Messanordnung wegen einer Teepause für kurze Zeit unbeachtet ließ. Als er wenig später zurückkam, hatte sich die Position der Sonne am Himmel und entsprechend das Spektrum relativ den zu Thermometern verschoben. Zu seiner Überraschung stellte er fest, dass jenseits des roten Spektralbereichs, also dort, wo nichts mehr zu sehen ist, eines der die höchste Temperatur Thermometer anzeigte. Herschel wiederholte das Experiment mehrmals und kam zu dem Schluss, dass es eine Strahlung geben muss, die der Mensch nicht sehen kann. Mit dieser Entdeckung hatte Herschel, ohne es zu ahnen, ein neues, großes Fenster für die Astronomie geöffnet (Bild univie.ac.at)



Kurz nach Herschels Entdeckung kam der Wunsch auf, auch den Mond, die Planeten, die Asteroiden und sogar die Kometen im Infrarotbereich (IR) zu beobachten. Weil noch keine besseren Detektoren als die Thermometer für die Infrarotstrahlung vorhanden waren, blieb dieser Wunsch der Astronomen sehr lange unerfüllt.



Ein erster wichtiger Durchbruch gelang erst 160 Jahre nach Herschels Entdeckung. Im Jahre 1961 erfand Frank J. Lows das Germanium-Bolometer, einen Detektor, der für den kompletten Infrarotbereich empfindlich ist. Die Wirkungsweise dieses Detektors basiert darauf, dass sich die elektrische Leitfähigkeit des Halbleitermaterials Germanium ändert, wenn es von Infrarotstrahlung getroffen wird. Wird eine konstante Spannung angelegt, so lässt sich die Veränderung des Widerstands sehr genau bestimmen und daraus wiederum die Menge an eingefallener Infrarotstrahlung ableiten (Bild ASP).

SOFIA, die fliegende Sternwarte

Die Erwartungen waren groß, das Infrarotweltall konnte nun erforscht werden! Ein großes Hindernis für Beobachtungen im Infraroten stellt jedoch die starke Absorption der Infrarotstrahlung durch die Erdatmosphäre, vor allem aufgrund ihres Schon bei relativ geringer Luftfeuchtigkeit waren Wasserdampfgehaltes, dar. Messungen im Infraroten praktisch unmöglich, und das, obwohl der Himmel wolkenlos erschien. Ein weiteres Problem war die thermische Eigenstrahlung des Teleskops (samt Instrument) und der Atmosphäre selbst auf Grund ihrer Temperatur. Entsprechend bestanden die nächsten Aufgaben darin, diese Hindernisse zu überwinden und den Germanium-Detektor sehr tief zu kühlen und ihn samt Teleskop so hoch wie möglich in die Atmosphäre zu bringen.

Mit diesem Ziel vor Augen kam der niederländische Astronom Gerard Kuiper in den 1960er Jahren auf die Idee, ein Infrarotteleskop an Bord eines Forschungsflugzeugs der NASA zu montieren. Obwohl das Flugzeug für Studien Erdatmosphäre der vorgesehen war und deshalb Sternenhimmelsaufnahmen mit dem installierten Teleskop nur durch die für die Atmosphärenbeobachtung vorgesehenen Flugzeugfenster möglich waren, gelang-en sofort erste interessante Entdeckungen (Bild NASA Archiv).



So wurde mit dieser ersten Flugzeugsternwarte, die den Namen Galileo erhielt, festgestellt, dass die dichte Wolkenhülle um Venus, nicht, bis wie dahin angenommen, aus Wasserdampf besteht, sondern hauptsächlich aus Schwefelsäuredampf. Die Untersuchung der Saturnringe erbrachte, dass diese Wassereis enthalten. Tragischerweise wurde Galileo im Jahre 1973 durch einen Zusammenstoß mit einem anderen Flugzeug bei der Landung zerstört. Astronomen und Piloten kamen ums Leben.

Ein zweites fliegendes IR-Observatorium war aufgrund der erzielten Erfolge schon im Bau, jedoch noch nicht fertig. Deswegen musste sofort ein Ersatz gefunden werden. Dazu wurde einem kleinen Lear-Jet ein Kabinenfenster herausgenommen, damit ein 30cm-Teleskop ungehindert den Infrarothimmel beobachten konnte.



Da der Lear-Jet über keine Kabine mit Druckausgleich verfügte, waren die Arbeitsbedingungen für die Astronomen an Bord äußerst schwer. Sie mussten auf dem Boden sitzen und während des Flugs Atemmasken und dicke Wärmeschutzanzüge tragen. Trotz all dieser Schwierigkeiten waren die Astronomen sehr erfolgreich. Sie entdeckten, dass Jupiter und Saturn mehr Energie im Infrarotbereich abstrahlen, als sie von der Sonne erhalten, was bedeutet, dass sie über interne Energiequellen verfügen (Bild NASA Archiv). Wolken, der im sichtbaren Licht wegen der starken Staubabsorption verborgen bleibt.

Darüber hinaus beobachteten sie zum ersten Mal den inneren Bereich interstellarer Wolken, der im sichtbaren Licht wegen der starken Staubabsorption verborgen bleibt.

Ein deutlicher Fortschritt wurde im Jahr 1974 mit dem Kuiper Airborne Observatory (KAO) der NASA erreicht. Dabei wurde einem Militärtransportflugzeug C-141 Starlifter ein Loch vor der linken Tragfläche in die Außenhaut geschnitten, groß genug für ein 91,5-cm-Teleskop. Dieses Teleskop ermöglichte es, das IR-Weltall aufgrund des viel größeren Spiegels tiefer und besser auflösend zu beobachten (Bild NASA Archiv)

Zur langen Liste der Entdeckungen mit dem KAO gehören die Uranusringe und die wenn auch dünne Methanatmosphäre von Pluto. Man erhielt die Bestätigung, dass Kometen teilweise aus Wasser bestehen und bekam Information über die Verteilung von Wasser und organischen Molekülen im interstellaren Raum. Das KAO wurde 1995 außer Dienst gestellt und vom Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie (SOFIA) abgelöst.



"Wachablösung" auf dem Flugfeld: KAO und SOFIA (NASA Archiv).

Aktivität 1: Das Herschel-Experiment selbst durchführen

Für das Herschel-Experiment brauchst du: ein Glasprisma, mattschwarze Farbe, drei Alkoholthermometer, eine Uhr und einen Karton.

Damit die Thermometer die Infrarotstrahlung der Sonne besser absorbieren können, färbst du zunächst ihr Vorratsgefäß für die Thermometerflüssigkeit schwarz. Nun misst du die Umgebungstemperatur im Schatten.





Mit dem Prisma, das du an der Kante des Kartons befestigst, erzeugst du ein möglichst breites Spektrum und positionierst anschließend jeweils ein Thermometer im blauen, im grünen und im infraroten Bereich. Über einen Zeitraum von 5 min ermittelst du die Temperaturen im Abstand von einer Minute und notierst sie (auch die Anfangstemperatur, die der Umgebungstemperatur entspricht). Bei allen drei Thermometern fällt sofort eine Temperaturerhöhung auf, am stärksten im infraroten Bereich (einige °C).

Zum Nachdenken Die Sonne gibt im grünen Spektralbereich die meiste Energie ab. Suche nach Gründen, warum diese Tatsache im Versuch anscheinend nicht zum Tragen kommt.



Das Licht als Wellenphänomen

Zeit (min)	Temperatur (°C) Blau	Temperatur (°C) Grün	Temperatur (°C) IR
Anfang			
1 min			
2 min			
3 min			
4 min			
5 min			

Messwert-Tabelle zum Herschel Experiment

Interpretation der Ergebnisse - Gründe für scheinbaren Widerspruch

Was ist Infrarotstrahlung, was ist Licht überhaupt?

2.1 Das Licht als Wellenphänomen

Das sichtbare Licht wie auch die für uns unsichtbare Infrarotstrahlung sind nur ein Teil der Strahlung, die die Sonne abgibt. Wir können Licht als Wellenphänomen beschreiben und sprechen hierbei von *elektromagnetischen Wellen*. Wichtige Größen zur Beschreibung einer Welle sind *die Wellenlänge* λ (der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder Wellentälern), *die Frequenz f*, die uns sagt, wie viele Wellenberge oder Wellentäler pro Sekunde bei uns ankommen und die Amplitude A, welche aussagt, wie hoch ein Wellenberg über die Nulllinie reicht. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto

mehr Wellen können pro Sekunde gezählt werden, und entsprechend höher ist die Frequenz (siehe Abb. unten). Umgekehrt wird die Frequenz kleiner, wenn die Wellenlänge zunimmt. Die Frequenz *f* lässt sich aus der Wellenlänge λ und der Ausbreitungsgeschwindigkeit *c* mittels der Beziehung $f = c / \lambda$ berechnen. Im Vakuum beträgt *c* rund 300.000 km/s.



Das farbige Spektrum des Sonnenlichts wird durch elektromagnetische Wellen erzeugt, die unterschiedliche Frequenzen haben. Die Wellen im Violettbereich haben eine höhere Frequenz als die im Blaubereich und diese wiederum eine höhere als die Wellen im Rotbereich. Außerhalb des Rot- und des Violettbereichs erstreckt sich das elektromagnetische Spektrum zu kürzeren (Ultraviolett, Röntgen- und Gammastrahlung) und längeren (Infrarot, Mikround Radiowellen) Wellenlängen. Diese elektromagnetischen Wellen können wir mit unseren Augen nicht wahrnehmen, weil die "Detektoren" unserer Augen (die Sehzellen in der Netzhaut des Auges) nicht empfindsam dafür sind.



Elektromagnetische Wellen *transportieren Energie*. Die Strahlungsenergie einer Welle hängt von der Frequenz und von der Amplitude der Welle ab. Je höher die Frequenz und je größer Amplitude sind, desto mehr Energie kann eine Welle transportieren: $E \sim f$, $E \sim A^2$.

Die Gammastrahlung (sehr hohe Frequenz) ist am energiereichsten, die Radiostrahlung (sehr niedrige Frequenz) am energieärmsten. Wichtig: Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird in Quanten (Energieportionen der Größe $E = h \cdot f$) transportiert (h ist eine Konstante, genannt das Plancksche Wirkungsquantum).

2.2 Die Wärmestrahlungsgesetze

Herschel hat im Jahre 1800 die Infrarotstrahlung entdeckt, doch die Beschreibung der Strahlung erwärmter Körper gelang erst mit dem Modell vom Schwarzen Körper (Gustav Kirchhoff, 1860).

Der Schwarze Körper ist ein rein hypothetischer Körper, der sich experimentell durch einen Hohlraumstrahler (Bild rechts) annähern lässt. Sein Absorptionsund Emissionsvermögen liegt bei allen Wellenlängen bei 100 %. Er strahlt nur abhängig von der Körpertemperatur und unabhängig von allen anderen Körpereigenschaften. Diese Eigenschaft macht ihn zu einer idealen Referenzguelle. Die Wärmestrahlung eines Schwarzen Körpers wird durch das Strahlungsgesetz, Plancksche das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben.



Ein Hohlraumstrahler der Temperatur *T* gilt als gute Näherung eines Schwarzen Körpers.

Das **Plancksche Strahlungsgesetz** (1) beschreibt die Verteilung der Intensität der elektromagnetischen Energie, die von einem Schwarzen Körper bei einer bestimmten Temperatur *T* in Abhängigkeit von Wellenlänge λ bzw. Frequenz *f* abgestrahlt wird. Im *P*- λ -Diagramm (siehe unten) spricht man von Planckkurven.

Das **Stefan-Boltzmann-Gesetz** gibt an, welche Strahlungsenergie ein Schwarzer Körper der absoluten Temperatur T pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit (2) oder insgesamt durch eine Fläche A (3) emittiert.

- (2) $S = \sigma \cdot T^4$
- $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$

Das **Wiensche Verschiebungsgesetz** (4) besagt, dass sich das Maximum der Strahlung eines Körpers umso stärker in den langwelligen Bereich des Spektrums verschiebt, je kühler er ist. Ein Körper mit Zimmertemperatur hat sein Strahlungsmaximum im Infraroten (genauer im MIR).

(4) $T \cdot \lambda = \text{konstant}$



σ...Stefan-Boltzmann-Konstante

S...Leistungsdichte

T...Temperatur

P...Leistung A...Fläche

Die Infrarotstrahlung (IR) als Teil des elektromagnetischen Spektrums

Der Infrarotbereich schließt sich an das rote Ende des sichtbaren Lichtspektrums an. Quelle der Infrarotstrahlung sind Körper mit einer Temperatur zwischen 2000 K (1700°C) und 10 K (-263 °C), weshalb alle Objekte, die wir in unserer Umgebung kennen im Infrarotbereich strahlen. Wir Menschen strahlen bei einer Körpertemperatur von 37°C die meiste Strahlung bei einer Wellenlänge von ungefähr 10 Mikrometer ab. Zu den kälteste Objekte überhaupt, mit einer Temperatur zwischen 20 und 50 K, zählen die Staubwolken, die in unserer Galaxis zu finden sind (wie der Pferdenkopfnebel im Sternbild Orion, rechts. Bild VLT, VLT KUEYEN mit FORS2).



Der Spektralbereich der Infrarotstrahlung wird in drei Unterbereiche aufgeteilt: Nahes (NIR), Mittleres (MIR) und Ferne (FIR) Infrarot.



Häufig wird die Infrarotstrahlung als Synonym für die Wärmestrahlung verstanden. Jedoch ist die Wärmestrahlung *nur ein Teil* des Infrarotbereiches, sie entspricht genau dem MIR-Bereich und ist damit die Strahlung, die durch die Atom- und Molekülbewegung erzeugt wird. Kurzwelligere Strahlung wie die NIR, visuelle, UV und Röntgenstrahlung werden durch Elektronenübergänge erzeugt.

Die Unterteilung in drei IR-Bereiche geht auf die Empfindlichkeitsgrenzen der verschiedenen Infrarotdetekoren und die Durchlässigkeitsfenster der Erdatmosphäre zurück. Vor allem der Wasserdampf in der Luft absorbiert sehr stark die FIR- Strahlung und lässt nur teilweise die MIR-Strahlung der Sonne und anderer Himmelskörper durch. Dasselbe gilt für den Kohlestoffdioxid.



Durchlässigkeit der Atmosphäre auf Mauna Kea (Hawaii, schwarze Linie) und in der Stratosphäre (rosafarbene Linie, Flughöhe von SOFIA). Das Ferne Infrarot (FIR, ab 30 Mikrometer) ist aus dem Boden aus nicht beobachtbar (Röser/SuW-Graphik).

Anwendung in der Astronomie 1: Sterne und die Gesetze der Strahlung

Die Farben der Sterne

Im Jahr 1814 untersuchte der Münchner Optiker Joseph von Fraunhofer (Bild unten links) das Sonnenspektrum und machte eine wichtige Entdeckung: Das Spektrum der Sonne zeigt schmale dunkle Linien. Er bestimmte die Intensität der Sonnenstrahlung in den verschiedenen Wellenlängenbereichen und stellte fest, dass die Sonne die meiste Energie im gelb-grünen Bereich ausstrahlt (siehe unten recht die von Fraunhofer gezeichnete Kurve oberhalb des Sonnenspektrums, sie heißt "spektrale Energieverteilung", von der Astronomischen Nachrichten, 1874).





Die Sonne erscheint uns aber nicht gelblichgrün, sondern wir sehen ihr Licht gelblich-weiß – wieso das? Die Ursache für diese Farbempfindung liegt in der Mischung aller Farben des Sonnenlichts in unseren Augen.

Nun, wenn wir die Sterne am Nachthimmel genau betrachten, können wir feststellen, dass nicht alle Sterne gelblich-weiß sind. Manche erscheinen uns weiß, andere bläulich und wieder andere rötlich. Die Begründung dafür finden wir im Wienschen Verschiebungsgesetz, demzufolge die Sterne ihre maximale Energie in Abhängigkeit von ihrer Oberflächentemperatur bei unterschiedlichen Wellenlängen ausstrahlen. Entsprechend verändert sich auch die Mischfarbe.



Rechts: Das Sternbild Orion. Die unterschiedlichen Farben der Sterne sind deutlich zu erkennen.



Die Planckkurven links zeigen die Energieverteilungen spektralen dreier unterschiedlichen Sternen. Wir sehen, dass kühle Sterne (a) mit T ~ 3.000 °C die meiste Energie im roten Bereich des Spektrums ausstrahlen. Sie erscheinen daher rötlich. Die Sonne, mit einer Temperatur von 6.000 °C strahlt ihre meiste Energie in grünen-gelben (b). Heißere Sterne Bereich strahlen hingegen strahlen die meiste Energie blauen im Wellenlängenbereich ab und sehen daher blau aus (c).

Zwischen der Oberflächentemperatur *T* eines Sterns und seiner Farbe gibt es folglich einen physikalischen Zusammenhang. Die Messungen der Astronomen besagen, dass die Oberflächentemperaturen der Sterne in einem Bereich zwischen 30.000 Kelvin (K) (blaue Sterne) und 2000 K (rote Sterne) liegen. Sterne, die der Sonne ähnlich sind (gelblich-weiße Sterne), haben Oberflächentemperaturen von etwa 5500 K.

Die Astronomen haben den Sternen anhand bestimmter Linien im Spektrum einen Typ (Spektraltyp) zugeordnet und die verschiedenen Typen zunächst alphabetisch bezeichnet. Später sortierten sie aufgrund der festgestellten Oberflächentemperaturen um. Daher ist nun die Reihenfolge für die wesentlichen Spektraltypen der Sterne O, B, A, F, G, K und M. In der unteren Tabelle sind die Temperaturbereiche und Sternfarben aufgelistet, die den jeweiligen Sterntypen (Spektraltypen) entsprechen.

Oberflächentemperatur (K)	Sternfarbe	Spektraltyp	Beispiel (heller Stern)
30000 – 60000	blau 📃	0	Mintaka (δ Ori)
10000 – 30000	blauweiß	В	Spika
7500 – 10000	weiß	A	Sirius
6000 – 7500	gelbweiß 📃	F	Prokyon
5000 - 6000	gelb 📃	G	Sonne
3500 – 5000	gelborange	K	Arktur
< 3500	rot	М	Beteigeuze

Die Reihenfolge der Spektraltypen innerhalb dieser Klassifikation kann man sich mit Hilfe eines Merkspruchs sehr leicht einprägen:

"Oh Be A Fine Girl, Kiss Me" oder "Oh Be A Fine Guy, Kiss Me"

Sterne entstehen in Gasund Staubwolken. die in der Scheibe des Milchstraßensystems zu finden sind, und haben unterschiedliche Temperaturen und Farben entsprechend ihrer unterschiedlichen Massen und Entwicklungsstadien. Je nach Entstehungsmasse können sie unterschiedliche Entwicklungsphasen ihrer in verschiedenen Zeiten durchlaufen und erreichen verschiedene Endstadien. Das untere Bild stellt die Entwicklung von Sternen unterschiedlicher (Geburts-)Masse dar.



- Braune Zwerge entstehen, wenn der Protostern weniger als ca. 0,07 Sonnenmassen (die Masseneinheit für Sterne ist eine Sonnenmasse: 1 Mo) besitzt. Diese Masse reicht nicht aus, damit es im Zentrum des Objekts zur Fusion von Wasserstoff zu Helium kommen kann. Entsprechend handelt es sich bei einem Braunen Zwerg nicht um einen Stern, sondern um einen Objekttyp zwischen Stern und planetarem Gasriesen. Je nach Masse und Alter reicht seine Oberflächentemperatur von etwa 600 – 3000 K (neue Spektraltypen T und L), sie strahlen also vornehmlich im Infraroten (Wiensches Strahlungsgesetz).
- 2. Sonnenähnliche Sterne sind wie die Sonne gelblich. Sie leben um die 10 Milliarden Jahre. Wenn ihre Kernenergie verbraucht ist, dehnen sie sich aus und werden zu Roten Riesen. Am Ende verlieren sie ihre äußeren Schichten (Planetarische Nebel entstehen) und der Kern wird zum Weißen Zwerg (etwa Erdgröße).
- 3. Sterne mit Massen von 10 Mo entwickeln sich schneller, denn sie verbrauchen ihre Kernenergie schneller (Lebensdauer etwa 15 Millionen Jahre). Sie enden als Rote Überriesen und beschließen ihr Leben durch eine gewaltige Explosion, eine Supernova. Der verbleibende Kern schrumpft dabei und wird zu einem sehr dichten Objekt, einem Neutronenstern.
- **4. Sterne mit Massen von 30 M**o haben ein ähnliches Schicksal wie die Sterne von 10 Mo, sie leben jedoch noch kürzer. Wenn sie zum Schluss als Supernovae explodieren, schrumpft ihr Kern so gewaltig, dass ein Schwarzes Loch entsteht.

Aktivität 2: Das "Spektrino", ein Visualisierungsmodell zum Spektrum

Das "Spektrino" ist ein Modell, das die Ausdehnung von Spektralbereichen entlang einer linear unterteilten Wellenlängenachse veranschaulicht, Spektralfarben sichtbar macht und verdeutlicht, dass neben dem mit dem Auge sichtbaren Licht andere Strahlungsbereiche existieren. Dazu brauchst du das Handspektroskop und eine Handykamera oder eine Digitalkamera.



Aktivität 2.a

Schalte das Spektrino ein. Unterhalb des Farbstreifens, der den sichtbaren Teil des Spektrums darstellt, siehst du entsprechende farbige Leuchtdioden (LEDs). Betrachte das Licht der LEDs durch das Handspektroskop und vergleiche es mit dem kontinuierlichen Spektrum einer Glühlampe. Beschreibe deine Beobachtungen.

Aktivität 2.b

Was ist mit den Leuchtdioden auf der rechte Seite des Spektrinos? Sind Sie vielleicht defekt? Nimm Deine Handykamera und schaue sie dir an. Beschreibe, was du siehst. Wie kannst du die unsichtbaren Strahlungsanteile nachweisen?



Aktivität 2.c

Der IR-Bereich (NIR, MIR, FIR) des elektromagnetischen Spektrums ist auf der linearen Wellenlängenskala um einen Faktor 873 größer als der sichtbare Bereich (380 – 780 Nanometer (nm)). Wie groß ist der IR-Bereich auf der Skala des Spektrino-Modells?

Aktivität 2.d

Markiere in Ergänzung zur linear geteilten Wellenlängenskala für die unten gegebene dezimal logarithmisch geteilte Skala die Bereiche des Visuellen und des Infraroten. Wie hast du die Bereichsgrenzen ermittelt?

10 ² nm	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶

3. Die Welt des Nahen Infraroten (NIR): Nachweis und Eigenschaften

Aktivität 3: Die Fernbedienung – ein NIR-Strahler im Wohnzimmer

Fernbedienungen sind für uns alltägliche Objekte. Viele wissen aber nicht, dass diese Infrarotstrahlung aussenden.

Aktivität 3.a

Nimm eine Fernbedienung und drücke auf eine der Tasten, während eine Mitschülerin oder ein Mitschüler Infrarot-LED der Fernbedienung mit die einer Handykamera betrachtet. Dann tauscht miteinander. Beschreibt eure Beobachtungen.

Aktivität 3.b

Suche nach Möglichkeiten, Signal das der Fernbedienung "um die Ecke" zu leiten. Beschreibe und begründe deine Ideen.





38 kHz-Trägersignal, ©Ebuss (wsrp)

Bitfolge durch Modulation des 38 kHz-Trägersignals (Ausschnitt), ©Ebuss (wsrp)

Infrarot-Fernbedienungen senden IR-Lichtsignale mit einer Trägerfrequenz von z. B. 38 kHz aus (Bild oben links). Diese sonst kaum vorkommende Signalfrequenz ermöglicht Störsicherheit. Dem Trägersignal wird eine Pulsfolge aufmoduliert. 21 Wellenzüge des Trägersignals ergeben einen Puls (im Bild oben links ist der größte Teil eines Pulses zu sehen), der dann etwa eine Dauer von 0.5 ms hat.

Die Pausenlänge zwischen den Pulsen ermöglicht eine binäre Kodierung: Puls mit folgender gleichlanger Pause bedeutet Bit 1, Puls mit folgender doppelt so langer Pause bedeutet Bit 0. Jeder Tastendruck der Fernbedienung erzeugt eine bestimmt Bitfolge, die in Abständen solange ausgesendet wird, solange man drückt.

Aktivität 3.c

Die Abfolge der Impulse (rechtes Bild im Infokasten) der Fernbedienung erfolgt mit einer gewissen (mittleren) Frequenz, die du durch Auszählen der Impulse im Bild ermitteln sollst. Die Pausen dauern entweder so lange wie die Impulse oder doppelt so lange. Wegen der unterschiedlichen Pausenlänge wird von der mittleren Frequenz gesprochen.

Aktivität 4: NIR-Licht hörbar machen

(nach Dana Backmann, USRA) Auch wenn sich Lichtwellen und Schallwellen in vielerlei Hinsicht unterscheiden, der Wellencharakter ist ihnen gemeinsam. Entsprechend wollen wir Vergleiche anstellen.

Aktivität 4.a:

Informiere dich über die Frequenzbereiche des Sehens und des Hörens und vergleiche diese. Was kannst du feststellen? Was ist eine Oktave? Wie viele Oktaven umfasst der Bereich des Hörens? Wie groß sind die Frequenzbereiche des sichtbaren Lichts / des IR-Bereichs, wenn du diese mit musikalischen Intervallen vergleichst?

Aktivität 4.b:

Untersuche das NIR-Licht einer Fernbedienung mittels einer Solarzelle, die mit einem Aktivlautsprecher verbunden ist, der die Lichtimpulse in hörbare Schallfrequenzen umsetzt. Vergleiche die Tonhöhe mit der in Aktivität 3.3.1.c bestimmten Tonhöhe (Frequenz).

Aktivität 4.c:

Zwischen welchen Lichtfarben besteht im übertragenen Sinne ein Wohlklang und zwischen welchen ein Missklang (siehe Infokasten zur Musik)?



Information - Physik

Elektromagnetische Wellen mit Längen von 380 nm – 780 nm (Frequenzen von 384 – 789 Tera-Hertz, (THz)) erscheinen uns als (sichtbares) Licht. Für uns unsichtbar schließt sich daran der Infrarot- und der Ultraviolettbereich an.

Die Bereiche der so genannten Spektralfarben (Farbwahrnehmung / Farbensehen von Licht bestimmter Wellenlängen) sind folgende: *Rot:* 630 -750 (780) nm, *Orange:* 590 - 630 nm, *Gelb:* 570 -590 nm, *Grün:* 495 - 570 nm, *Blau:* 435 - 495 nm, *Violett:* 380 nm - 435 nm.

Hörbare Schallwellen haben Frequenzen zwischen 16 Hz und 20 kHz. Diese liegen also weit unterhalb der Lichtfrequenzen. Ein mit Hörfrequenz gepulstes Lichtsignal (mit einer Solarzelle in einen pulsierenden Stromfluss umgewandelt) wird mit einem Aktivlautsprecher (Lautsprecher + Verstärker) hörbar gemacht.



Information – Musik

Ein Ton bildet mit dem Grundton ein musikalisches Intervall, welches sich durch ein bestimmtes Frequenzverhältnis (f_{Ton} : $f_{Grundton}$) auszeichnet. Die Intervalle sind: die Prime (1:1), die Sekunde (9:8), die Terz (5:4), die Quarte (4:3), die Quinte (3:2), die Sexte (5:3), die Septime (15:8) und die Oktave (2:1). Quinte und Quarte sind Wohlklänge, Sekunde und Septime empfinden wir als Missklänge (Dissonanzen).



Aktivität 5 Emission von Licht, Emissionsprozesse und Termschema

(Für die Oberstufe)

Nutze die vorliegenden NIR-Indikatorkarten zum Nachweis der NIR-Strahlung einer Fernbedienung oder einer anderen Quelle.

5.a:

Bestimme die Wellenlänge (Spektralfarbe) des von der Karte abgegebenen Lichts anhand seiner Farbe (ein Handspektroskop mit Wellenlängenskala ist dabei hilfreich) und untersuche die Abhängigkeit der Nachweisfähigkeit der Karte von der Dauer der Bestrahlung mit NIR-Licht. Die Untersuchung sollte in einem stark abgedunkelten Raum erfolgen. Beschreibe die Versuchsergebnisse in systematischer Form.



5.b:

Ein Leuchtstoff gibt nach Einstrahlung von IR-Licht grünes Licht (λ =550 nm) ab. Berechne die Wellenlänge der IR-Strahlung, wenn eine Zweiphotonenabsorption (siehe Info-Kasten, Fall IV) gegeben ist.



Fall I - Fluoreszenz: Das Elektron wird durch Absorption eines Lichtquants (z. B. UV) oder durch Stoß vom Grundzustand in einen angeregten Zustand gehoben (1). Von dort aus verliert es quasi ohne Zeitverzögerung strahlungslos je nach dem Fluorophorkristall mehr oder weniger Energie, kommt dabei auf einen Zwischenzustand (2) und gibt dann die verbleibende Energie in Form eines energieärmeren Lichtquants wieder ab (3).

Fall II - spontane Phosphoreszenz: Die Schritte (1) und (2) verlaufen wie in I, nur dass im phosphoreszierenden Kristall das Elektron eine größere Aufenthaltsdauer im Zwischenzustand besitzt. Die verbleibende Energie wird spontan, aber mit zeitlicher Verzögerung in Form eines energieärmeren Lichtquants abgegeben, d. h. nach der Anregung hält das Leuchten noch eine Zeit lang an (3).

Fall III - Phosphoreszenz nach IR-Stimulation: Die Schritte (1) und (2) verlaufen wieder wie in I. Diesmal kommt es aber nur im kleinen Umfang zur spontanen Entladung des Zwischenzustands. Die restliche Energie bleibt solange gespeichert bis ein IR-Photon die Strahlungsabregung stimuliert (3).

Fall IV - Fluoreszenz nach Zweiphotonenabsorption: Bestimmte Leuchtstoffe ermöglichen die Absorption eines Photons (z. B. IR) und vom erreichten Zwischenzustand quasi gleichzeitig die Absorption eines weiteren Photons (z. B. noch einmal IR, (1)). In der Summe der absorbierten Energien wird ein angeregter Zustand erreicht, bei dessen Strahlungsabregung dann ein sichtbares Photon frei wird (2).

Aktivität 6: Eigenschaften der NIR-Strahlung - Reflexion

Das Übertragungsbild einer Überwachungskamera oder einer Webcam mit NIR-Beleuchtung wird auf einem Computerbildschirm angezeigt. Für die Überwachungskamera brauchst du als Anschluss vom Video-Ausgang der Kamera zum USB-Eingang des Computers einen entsprechenden Adapter (im Bild links).

Betrachte, vergleiche und beschreibe die Bilder

verschiedener Test-Objekte im Visuellen und im NIR:

a.) von Pflanzenblättern auf grünem Hintergrund,

- b.) von einem EURO-Geldschein,
- c.) vom nackten Arm.

Die Untersuchung sollte in einem abgedunkelten Raum stattfinden. Versuche eine erste Erklärung für die Beobachtungen.

Fragen: Wie erscheinen die Blätter im NIR? Beschreibe auch deine Beobachtungen beim Geldschein und beim nackten Arm. Warum erscheinen die Augen im NIR-Licht mit weißen Pupillen? Wie funktioniert eine Überwachungskamera?

Information – Physik/Biologie

Die Wellenlängenabhängigkeit von Reflexion, Transmission und Absorption bestimmt die Farbigkeit unseres Alltags. Im Bereich des fotografischen IR bekommt das gewohnte Bild neue Facetten. Blattgrün erscheint im nahen Infrarot strahlend weiß (siehe Bild rechts \rightarrow Wood-Effekt), weil Chlorophyll im infraroten Bereich transparent ist und die Zellstruktur der Blätter sehr stark und breitbandig reflektiert.





Information – Geografie/Fernerkundung der Erde

Der Unterschied zwischen der Reflexion im sichtbaren und im NIR-Bereich kann zum Nachweis der Photosynthese und des Pflanzenwachstums dienen. Der Woodeffekt spielt so bei der **Fernerkundung des Planeten** Erde unter biologischen und landschaftsökologischen Aspekten (Gewinnung von Vegetationskarten) eine wichtige Rolle. Das rechte Bild zeigt Vegetationskarten von Europa und Afrika im Januar und im Juli. Grün zeigt starkes und braun fehlendes Wachstum an (Bild: eduspace.esa.int).





Aktivität 7: Eigenschaften der NIR-Strahlung – Transmission und Absorption

Aktivität 7: Eigenschaften der NIR-Strahlung – Transmission und Absorption

Auch hinsichtlich von Transmission bzw. Absorption gibt es markante Unterschiede zwischen sichtbarem Licht und NIR-Strahlung. Im vorliegenden Fall wird Cola untersucht. Ein Testobjekt wird durch die Cola hindurch, d. h. nach der Transmission des Lichts durch die Cola, im Visuellen und im NIR betrachtet. Für die NIR-Beobachtung wird erneut das Übertragungsbild einer Überwachungskamera oder einer Webcam mit NIR-Beleuchtung herangezogen. Die Untersuchung sollte in einem stark abgedunkelten Raum stattfinden.



Beschreibe deine Beobachtungen und versuche eine Erklärung.



Rechnung: Angenommen, 10^6 visuelle Photonen ($\lambda \approx 500$ Nanometer (nm)) und ebenso viele NIR-Photonen ($\lambda \approx 920$ nm) werden in die für das Diagramm im Info-Kasten verwendete Cola-Probe eingestrahlt. Wie viele Photonen werden jeweils durch die Probe hindurch gelassen?

Anwendung in der Astronomie 2: Durch Staubwolken in der Galaxis sehen

Zwischen ungefähr 0,8 und 1,1 Mikrometern ist es möglich, in der Astronomie dieselben Beobachtungsmethoden wie für sichtbares Licht anzuwenden. Im Nahen Infrarot "verblassen" jedoch die heißen blauen Sterne etwas, die wegen ihrer hohen Temperatur im sichtbaren Licht deutlich sichtbar sind, und kühlere Sterne (Rote Riesen und Rote Zwerge) tauchen auf.



Sichtbares (links) und NIR-Bild des galaktischen Zentrums. Sichtbares Bild: ©Howard McCallon Infrarotbild: ©2 Micron All Sky Survey (2MASS)

So sind z. B. im Visuellen (Bild oben links) vor allem drei Sterngruppen im Staubband sichtbar (mittig bläulich, rechts unten rötlich), während diese im NIR-Bild rechts fast nicht erkennbar sind. Das NIR-Bild zeigt dafür kühlere, rötliche Sterne, die im sichtbaren Licht nicht erscheinen. Diese Sterne sind hauptsächlich Rote Riesen.

Durch Staub sehen

Der interstellare Staub, der in den Gas-Staub-Wolken in der Scheibe der Milchstraße existiert, wird im NIR zunehmend transparent (lichtdurchlässig), d. h., er absorbiert im NIR weniger als im Visuellen. Dies ist so, weil die Wellenlängen der NIR-Strahlung größer sind als der durchschnittliche Durchmesser der Staubteilchen. Diese absorbieren vor allem die Strahlung mit kürzeren Wellenlängen, wobei der Staub erwärmt wird. NIR-Beobachtungen ermöglichen also einen tieferen Einblick in die Zentren von Galaxien



oder in die Geburtsstätten der Sterne, wie es die Aufnahmen der Dunkelwolke B68 (Barnard 68) deutlich zeigen (rechtes Bild im NIR, linkes Bild im Visuellen, Bilder: ESO/VLT).

Aktivität 8: Das Dunkelwolkenmodell

Mit dem sogenannten Dunkelwolkenmodell kann demonstriert werden, wie Astronomen in oder hinter kosmischen Staubwolken Sterne auffinden können. Als Sterne fungieren NIR-Sendedioden, die in eine Holzplatte hinter einem Foto einer Dunkelwolke montiert werden. Die für das Auge unsichtbaren Quellen lassen sich mit einer Digitalkamera nachweisen.

Da das Modell besonders eingängig und einfach nachzubauen ist, eignet er sich gut für einen Einstieg in die IR-Astronomie. Beim Bau des Modells wenden Schülerinnen und Schüler Kenntnisse über Stromkreise in der Praxis an. Dies bringt ihnen eine wichtige und positive Erfahrung. Das Modell ermöglicht die Nachstellung astronomischer Arbeit: Die Sternenkoordinaten können auf dem Foto mit den sichtbar gewordenen Modell-Sternen ermittelt werden.





Aktivität 8.a: Herstellung des Dunkelwolkenmodells

Arbeitsanleitung

- Schneide das Foto von B68 aus (18 cm x 18 cm) und säge die MDF-Platte entsprechend zu.
- 2.) Markiere die Positionen der 5 Modellsterne im Gebiet der Dunkelwolke auf der MDF-Platte. (Dazu kannst du die Positionen der auf dem NIR-Foto von B68 erscheinenden Sterne in der Wolke nutzen.)
- Nun bohre die 5 Löcher für die LEDs (5 mm-Bohrer) und erweitere rückseitig mit dem 6 mm-Bohrer etwa 3 mm tief.
- Jetzt solltest du dir überlegen, wie du die 4.) 5 LEDs zusammenschaltest, dass SO der entsprechende Strom in Durchlassrichtung fließt, aber nicht überschritten wird (!). Reicht die Spannung des Steckernetzteils aus, so könntest du z. B. alle 5 Dioden in Reihe schalten und die exakte Anpassung durch einen Vorwiderstand erreichen. (Ein Vorwiderstand ist zur Strombegrenzung auf jeden Fall nötig.) Eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung bietet ein Spektrum an Möglichkeiten. Den Leitungsverlauf solltest du mit Bleistift aufzeichnen, wobei du die Polung deutlich markieren solltest.
- 5.) Nun kannst du die 5 LEDs rückseitig einstecken (Polung beachten: abgeflachte Seite der Diode zeigt die Kathode, d. h. den negativen Pol).
- 6.) Zur Verbindung der Dioden reichen oft schon ihre Kontaktdrähte aus, die du entsprechend des Schaltungsverlaufs umbiegst. Jeweils 2 benachbarte Kontaktdrähte enden auf dem Kopf einer zuvor passend eingedrückten Heftzwecke, wo du sie anlötest. (Die Heftzwecken halten zugleich die Schaltung an der Platte.)
- 7.) Vervollständige den Schaltkreis durch Einbau des Vorwiderstands zur Strombegrenzung und durch Anschlussdrähte, die zu den Einbaubuchsen für Bananenstecker oder einfach zu einer Lüsterklemme führen. Dort wird letztlich das Netzteil angeschlossen: Polung deutlich vermerken Du kannst auch noch einen Druckschalter einbauen.



Festlegung der Positionen der LEDs.



Eindrücken der Heftzwecken.



8.) Befestige Bananenstecker an der Stromzuführung des Steckernetzteils.

9.) Säge nun zwei 18 cm und zwei 19 cm lange Stücke von der 5 mm dicken und 4 cm breiten Holzleiste ab. Befestige die zugeschnittenen Leistenstücke mit Klebstoff und Nägeln als Umrahmung der Platte so, dass sie etwa 5 mm über die Bildebene ragen. Rückseitig schützt die Umrahmung mit 25 mm Überstand die Schaltung und ermöglicht die Aufstellung vertikale des Modells. Baue in die Leiste die Einbaubuchsen für die Stromzuführung vom Netz-



Anbringen des Leistenrahmens.

gerät und evtl. einen Druckschalter ein.

- 10.) Setze abschließend das anfangs ausgeschnittene Foto in den Rahmen, decke es evtl. durch eine stabile Klarsichtfolie ab befestige sie unauffällig.
- 11.) Ein Funktionstest mit einer Digitalkamera zeigt, ob alle Verbindungen leitend sind. Sollten die LEDs nicht funktionieren, so kannst du die Schaltung mit Hilfe eines einfachen Universalmessgeräts schrittweise auf Stromfluss testen.

Materialliste

- ein leerer Joghurtbecher mit
 - 5 NIR-Lumineszenzdioden (5 mm) vom Typ: TSAL 6100 (940 nm) oder TSHF 5410 (890 nm) oder LI521 (870 nm), oder …
 - 2 Einbaubuchsen (4 mm, 10 A) und 2 Bananenstecker Alternative: 1 Lüsterklemme samt kleiner 10 mm Holzschraube
 - o evtl. 1 Druckschalter
 - o 10 Heftzwecken (Stahl vermessingt)
 - o 20 cm Draht
 - Widerstände nach Bedarf (je nach Ausgangsspannung des Steckernetzteils)
- Stecker-Netzteil z. B) 9 V DC, 250 mA (Stromquelle aus Physik-Sammlung möglich)
- Mitteldichte Faserplatte (MDF-Platte, 18 cm x 18 cm x 1 cm)
- Holzleiste (80 cm x 4 cm x 0,5 cm)
- 10 Nägel (Länge etwa 2 cm)
- Evtl. 2 kleine Holzschrauben (10 mm lang)
- Klebstoff für Holz
- 2 Farbausdrucke eines quadratischen Feldes identischer Lage und Größe von Aufnahmen der Dunkelwolke Barnard 68 (B 68) oder des Konus-Nebels (oder …) im NIR und im Visuellen, Größe 18 cm x 18 cm
- 1 Klarsichtfolie als Schutzabdeckung für das Foto

Werkzeugliste

- Bohrmaschine
- Holzbohrer (5, 6, 8, 10, 12 mm)
- Kleiner Schlosserhammer
- Seitenschneider, Abisolierzange, evtl. Greifzange
- Laubsäge, Sandpapier
- Schere, Messer, Cutter-Messer
- Lötset (Lötkolben, Ablage, Lötzinn, evt. Flussmittel)
- Schraubenzieher für Lüsterklemme
- Evtl. Kreuzschlitz-Schraubenzieher für kleine Holzschraube
- Universalmessgerät, 2 Verbindungsleiter, 2 Krokodilklemmen
- Lineal, Dreieck, Bleistift, Radiergummi



Das Modell (eine ältere Version, die größer und nicht quadratisch ist) ist fertig und kann nun getestet werden.

Aktivität 8.b: Koordinatenbestimmung mit dem Dunkelwolkenmodell

Fotografiere B68 im Dunkelwolkenmodell bei eingeschalteten NIR-Leuchtdioden.mit einer Digitalkamera. Auf dem Foto siehst du im Bereich der Dunkelwolke einige Sterne,

die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind. Drucke das Foto aus bzw. übertrage es auf den Computermonitor. Bestimme mit Hilfe der in der rechten Abbildung für die Referenzsterne 1 und 2 gegebenen Himmelskoordinaten (Rektaszension α , Deklination δ) die Koordinaten der "neu entdeckten" Sterne.

Stern 1: $\alpha = 17^{h} 23^{min} 23^{s}$, $\delta = -23^{\circ} 50' 43''$ Stern 2: $\alpha = 17^{h} 23^{min} 6^{s}$, $\delta = -23^{\circ} 48' 31''$ Nimm an, dass die Koordinaten in diesem Himmelsgebiet durch ein kartesisches Koordinatensystem beschrieben werden können, dessen Achsen (α -Achse und δ -Achse) so wie in der Abbildung gezeigt verlaufen.



Vorgehensweise

Miss die Abstände in α - und δ -Richtung mit einem Lineal auf dem Ausdruck oder mit der Maus auf dem Monitor (Pixeldifferenz). Rechne dann diese in Millimetern oder Pixeln angegebenen Abstände in das Zeitmaß (für α) oder das Gradmaß (für δ) um, wobei die Referenzsterne den Maßstab liefern. Die fertigen Koordinaten erhältst du dann einfach durch Hinzufügen oder Abziehen der Ergebnisse von den Koordinaten der Referenzsterne (*1 und 2 sind die Referenzsterne)

Stern	Abstand zum	Abstand zum	α	δ
Nr.*	Referenzstern 1	Referenzstern 2	(h min s)	(° ' ")
	in α-Richtung	in δ-Richtung		
	(mm oder Pixel)	(mm oder Pixel)		
1	0		17 ^h 23 ^{min} 23 ^s	-23° 50' 43"
2		0	17 ^h 23 ^{min} 6 ^s	-23° 48' 31"
3				
4				
5				
6				
7				

Information – Mathematik

In der Astronomie finden verschiedene sphärische Koordinatensysteme Anwendung. Im fest mit der scheinbaren Himmelskugel verbundenen Äquatorsystem werden die Deklination δ (entspricht dem Breitengrad auf der Erde) und die Rektaszension α (entspricht dem Längengrad auf der Erde) gemessen. Während δ in Grad, Bogenminuten und Bogensekunden (°,',") angegeben wird, verwendet man für α die Zeiteinheiten Stunden, Minuten und Sekunden (h, min, s). Die rotierende Erde bedeutet: $360^{\circ} \rightarrow 24$ h (Bild. *GNU-FDL*).



Anwendung in der Astronomie 3: Die Masse Schwarzer Löcher

Lange schon wurde die Existenz eines Schwarzen Loches im Zentrum des Milchstraßensystems vermutet. Staubwolken in der Milchstraßenebene behindern sehr den Blick ins galaktische Zentrum (Bild links). Erst Nahinfrarotbeobachtungen machten einen Einblick in die Zentralregionen möglich (Bild rechts).





unter www.wissenschaft-schulen.de.

In diesem Wellenlängenbereich Sterne beobachtet konnten werden, die sich nahe dem Zentrum Milchstraßendes systems befinden. Die über Jahre hinweg beobachteten Positionen dieser Sterne ermöglichten die Ermittlung ihrer Bahnen (die Bahnen von fünf zentrumsnahen Sternen sind im Bild dargestellt). Darauf aufbauend konnte eine zentrale Masse von etwa 3.7 Millionen Sonnenmassen mittels des 3. Keplerschen Gesetzes bestimmt werden. Davon entfallen 2,6.10⁶ Sonnenmassen auf das supermassive Schwarze Loch (Pfeil). Schulgerechte Materialien zum Thema Schwarzes Loch im Milchstraßenzentrum findet ihr

4. Die Welt des Mittleren Infraroten (MIR)

Der MIR-Bereich der elektromagnetischen Strahlung reicht von 5 bis 30 Mikrometer (µm) Wellenlänge. Im Folgenden könnt ihr zunächst einige physikalische Grundlagen erwerben oder reaktivieren. Nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise einer MIR-Kamera (Thermografiekamera) könnt ihr diese dann anwenden und dabei erstaunliche Entdeckungen in der Welt des Mittleren Infraroten machen.

Laut dem Wienschen Verschiebungsgesetz haben Körper, deren Emissions-Maximum im oben angegebenen Wellenlängenbereich liegt, eine Temperatur von etwa 150 - 600 K. Folglich emittieren Körper bei Zimmertemperatur (ca. 20 °C bzw. 293 K) im MIR mit maximaler Intensität (bei einer Wellenlänge von ca. 10 µm). Zur Betrachtung unserer Umwelt im MIR sollte also eine Kamera verwendet werden. die im Wellenlängenbereich um die 10 µm herum empfindlich ist. Dearartige handelsübliche Thermografiekameras arbeiten bei etwa 8-14 µm.

Die gesamte Strahlungsleistung eines Körpers nimmt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (siehe vorne) sehr stark mit der



Temperatur zu. *Dieser Zusammenhang wird genutzt, um von der empfangenen Strahlungsintensität auf die Temperatur eines Körpers zu schließen.* Deshalb bezeichnet man die MIR-Kameras auch als Thermografie-Kameras.

Allerdings wird nicht alle Strahlung, die wir von einem Körper empfangen, von diesem auch abgestrahlt (emittiert). Hinzu kommen Reflexion und Transmission von Strahlung, die Objekte der Umgebung emittieren.

Die Welt des Mittleren Infraroten unterscheidet sich deutlich von der Welt im sichtbaren Licht. Während das Licht, das wir mit unseren Augen wahrnehmen, hauptsächlich von reflektierter Strahlung der betrachteten Objekte stammt, die von der Sonne oder von künstlichen Lichtquellen stammt, wird die Strahlung im MIR maßgeblich von der Emission dieser Objekte bestimmt. Auch bei der Transmission gibt es Unterschiede. So ist Luft für MIR-Strahlung nur in bestimmten Spektralbereichen des MIR durchsichtig (transmittierend). Wasser und Glas sind im MIR gar nicht transmittierend bzw. stark absorbierend. Auch die Reflexionseigenschaften sind im MIR gegenüber dem sichtbaren Licht verschieden, wobei allein schon die Oberflächenrauigkeit die jeweilige Reflexionsart (spiegelnd oder diffus) bestimmt.

4.1 Wie funktionierenThermografie-Kameras

Grundsätzlich erfüllen Thermografie-Kameras zwei Aufgaben: die quantitative Temperaturmessung eines Objekts und die Darstellung der MIR-Strahlung in einem Wärmebild. Wärmebilder sind Falschfarbenbilder zur Anzeige der MIR-Bilder.

Es existieren verschiedene Typen von Kameras. Die Unterscheidung kann nach mehreren Kriterien durchgeführt werden. Der detektierte Wellenlängen-Bereich ist ein Einordnungskriterium. So wird zwischen "Short Wave"-Kameras (empfindlich bei 2 - 5 μ m, astronomisch gar nicht im MIR) und "Long Wave"-Kameras (empfindlich bei 8 - 14 μ m) unterschieden. Ein anderes Kriterium bilden die verschiedenen Aufnahmeprinzipien.

Eine weite Verbreitung finden Focal Plane Array-Kameras (FPA-Kameras). Die Optik dieser Kameras entspricht im Prinzip der einer Digitalkamera. Eine Linse bildet die Strahlung auf eine Detektor-Matrix (Engl. Array) ab. Doch besteht die Linse im MIR z. B. aus Germanium und der Detektor kann kein CCD-Chip sein. Für jedes Bildelement der MIR-Detektor Matrix ist ein eigener Detektor vorhanden.

Wir unterscheiden zwischen gekühlten und ungekühlten Systemen. Günstig im Einsatz sind die ungekühlten FPA-Kameras. Ihre Detektoren



heißen Bolometer. Diese bestehen aus einem Halbleitermaterial (z. B. Vanadiumoxid), das seinen Ohmschen Widerstand entsprechend der entstehenden Temperatur (durch die absorbierte einfallende Strahlung) ändert.



Das Wärmebild entsteht, indem für jedes Bildelement der gemessene Widerstand in einen Farbwert umgewandet wird. Die fehlende Kühlung hat einen Verlust an Empfindlichkeit und Genauigkeit zur Folge. Dafür sind FPA-Kameras sehr kostengünstig (ca. 4000 Euro) und sind klein und handlich. Jedoch hat jedes einzelne Bolometer eine eigene Kennlinie und eine ohnehin variable Temperatur. Deswegen muss die Kamera oft kalibriert werden. Zudem beeinflussen sich die Bolometer durch Wärmeleitung gegenseitig.

Wie funktionieren Thermographie Kameras

Anwendungen von Thermografie-Kameras

Thermografie-Kameras finden zunehmend Anwendung. Ursprünglich wurden sie für das Militär entwickelt und werden dort auch heute noch als Nachtsichtgeräte und Zielsuchsysteme für Raketen eingesetzt. Die Feuerwehr verwendet MIR-Kameras bei Einsätzen in der Dunkelheit und vor allem im dichten Rauch und Nebel. Personen



Thermografie-Anwendung: Defekte (links) und funktionierende Kabelverbindung.

können durch ihre Körperstrahlung im MIR gut erkannt und so gerettet werden. In der Medizin bieten MIR-Kameras eine schnelle Diagnose-Möglichkeit z. B. bei der Erkennung von Gefäßkrankheiten (siehe Bild unten links).

Im Bauwesen gibt es mehrere Anwendungen für die Thermografie. Lecks in Rohren werden sichtbar. Dazu wird in das undichte Rohr heißes Gas gepumpt, das am Leck austritt und die Umgebung erwärmt. Diese Erwärmung ist dann mit der Kamera zu sehen. Auch die

Isolation von Gebäuden kann überprüft werden. Wärme dringt an schlecht isolierten Stellen schneller nach außen. Auch Heizungsrohre in Fußböden können schnell aufgespürt werden. In der Industrie gibt es viele Einsatzmöglichkeiten für MIR-Kameras. Beim Abkühlen nach dem Guss von Metall oder Kunststoffen ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung notwendig. Auch sie kann durch Thermografie kontrolliert werden. Elektronische Komponenten oder mechanische Bauteile erwärmen sich oft, wenn sie defekt oder überlastet sind. Das fällt im Wärmebild sofort auf. Im Bild oben sind eine defekte und eine funktionierende Kabelverbindung gegenübergestellt.

Schließlich nutzen auch verschiedene Wissenschaften MIR-Kameras. In der Geologie können so beispielsweise bestimmte Gesteins-Strukturen erkannt werden. In der Astronomie wird mit der Thermografie-Kamera z. B. Staub sichtbar gemacht, der nicht warm genug ist, um im Visuellen zu strahlen.



Aktivität 9: Die Emission von MIR-Strahlung

(Für diese Versuche braucht ihr eine Thermografie-Kamera!)

Untersucht verschiedene Objekte - auch eure Körper - mit einer Thermografie-Kamera. Tragt die die Ergebnisse in eine Tabelle ein, die den Vergleich zwischen dem Anblick im MIR und im Visuellen beinhaltet.



Personengruppe im Visuellen (links) und im MIR (rechts).

Aktivität 9.a:

Beobachtet mit der Thermografie-Kamera Menschen ohne und mit Brille. Was könnt ihr feststellen und warum?

Aktivität 9.b:

Einige von euch reiben ihre flachen Hände ca. 10 Sekunden lang kräftig aneinander und drücken sie danach fünf Sekunden lang fest auf eine glatte Tischplatte. Betrachtet die Auflagestelle sofort nach dem Entfernen der Hände vom Tisch mit der Thermografie-Kamera. Was könnt ihr feststellen und warum?

Aktivität 9.c:

Nimm eine abgekühlte Getränke-Flasche und drücke sie zehn Sekunden lang an deine Wange. Fotografiere danach ohne Flasche dein Gesicht mit der Thermografie-Kamera.

Beschreibe deine Beobachtungen und versuche eine Begründung.

Aktivität 9.d:

Halte vor das Gesicht einer Mitschülerin oder eines Mitschülers eine schwarze Mülltüte und fotografiere dies mit der Thermografie-Kamera. Wiederhole den Versuch mit einem aufgeblasenen Luftballon. Notiere deine Beobachtungen und suche nach einer Erklärung.



Aktivität 10: Barrieren für das Infrarote – Absorption in der Erdatmosphäre

Aktivität 10.a:

Betrachtet eine IR-Lampe durch ein halb mit Wasser gefülltes durchsichtiges Gefäß zum einen durch den wassergefüllten und zum anderen durch den luftgefüllten Teil.

Verwendet im zweiten Teil des Experiments die Hand als Detektor für den IR-Teil der Lampenstrahlung. Haltet die Hand ebenso erst hinter den wassergefüllten und dann hinter den luftgefüllten Teil des Beckens (Bild: DLR).

Stellt eure Beobachtungen übersichtlich in einer Tabelle dar.



Aktivität 10.b:

Versucht mit Hilfe der Messung des Temperaturanstiegs (z. B. innerhalb von 5 min) abzuschätzen, wie viel Strahlungsenergie der IR-Lampe das Wasser (c = 4,183 kJ·kg⁻¹·K⁻¹) aufnahm. Welche Angaben brauchst du dazu noch? Beschaffe sie dir. Welche Annahmen liegen zugrunde?

Aktivität 10.c:

Führe eine Analogiebetrachtung durch zwischen dem Wassermolekülmodell im IR-Koffer und einem mechanischen Dämpfungselement, wie es z. B. zum Erdbebenschutz von Gebäuden eingesetzt wird (siehe Info-Kasten unten). Ordne auch die Größe der Federkonstante (groß / mittelgroß / klein) der entsprechenden federnden Verbindung zu.



Anwendungen in der Astronomie 4: Die Strahlung kalter Objekte

Beobachtungen in Teilen des NIR werden seit den sechziger Jahren des 20. Jhs. von Bodenobservatorien gemacht. Im MIR ist dies nur stark eingeschränkt möglich. Im Fernen Infrarot (FIR) können Beobachtungen nur oberhalb des Wasserdampf enthaltenden Teils unserer Erdatmosphäre durchgeführt werden, weil die langwellige Infrarotstrahlung keine atmosphärischen Durchlassfenster findet (siehe Diagramm in Abschnitt 3.3). Aus diesem Grund muss SOFIA mit dem 17 Tonnen schweren 2,7-m-Spiegelteleskop 13 km hoch fliegen! Astronomische Beobachtungen im MIR und FIR erfordern außerdem den Einsatz von speziell gekühlten Detektoren.

Beinahne jedes Objekt im Weltraum gibt auf Grund seiner Temperatur Infrarotstrahlung ab. Die Wellenlänge, bei der ein Objekt strahlt, hängt entsprechend dem Wienschen Verschiebungsgesetz von seiner Temperatur ab. *Deswegen erscheint ein Objekt umso weiter im FIR, je kühler es ist.*



Visuell (Bildzusammenstellung von Robert Hurt)

NIR

FIR

Ein kosmisches Objekt kann bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich aussehen. Das verdeutlichen die obigen Fotos vom Gebiet des Pferdekopfnebels (im Sternbild Orion). Im NIR-Bild sind im Vergleich zum Bild im Visuellen mehr (vor allem kühlere) Sterne erkennbar. Wie wir bereits gesehen haben, wird Staub im Nahen Infrarot viel durchsichtiger. Daher können wir Sterne beobachten, die im sichtbaren Licht vom Staub verdeckt sind. Bei noch größeren Wellenlängen - im FIR, (rechtes Foto) sehen wir die Infrarotstrahlung des kalten Staubs selbst. Die im Staub eingebetteten Sterne, die heißer als der Staub sind, werden von ihm überstrahlt. Die Bestimmung der Staubdichte und Staubverteilung in solchen Gaswolken, die für das Verständnis der Prozesse der Sternentstehung sehr wichtig sind, wird durch FIR-Beobachtungen erst möglich.

Auf der Suche nach jungen Sonnensystemen im MIR

Junge Sterne und ihre Planeten entstehen in so genannten protoplanetaren Scheiben, die wiederum aus Gas- und Staubkonzentrationen in den riesigen Molekülwolken in den Spiralarmen der Milchstraße entstehen. Wenn diese protoplanetaren Scheiben kontrahieren, erwärmen sie sich und heben sich im MIR vom Molekülwolkenhintergrund ab. Die im Visuellen und im NIR aufgenommenen Fotos unten zeigen den Orionnebel, eines der aktivsten Sternentstehungsgebiete der Milchstraße. In diesem Nebel haben sich viele protoplanetare Scheiben gebildet, die sich in den vier Bildern in der Mitte vor dem hellen Hintergrund der Nebelstrahlung abheben. Aus den zentralen Verdichtungen dieser Scheiben entstehen Sterne (leuchtende Punkte), während aus den umgebenden Scheiben Planeten entstehen. Das Foto rechts zeigt einen jungen Stern, der von der protoplanetaren Scheibe verdeckt wird (Blick auf Scheibenkante).



Der Entstehungsprozess der Planeten aus Staubkörnern dauert mehrere Millionen Jahre. Staubkörner mit Mikrometergrößen klumpen zusammen und formen so genannte Planetesimale von Kilometergröße (wie Asteroiden und Kometenkerne). Dies bedeutet, dass das junge Sonnensystem vor Milliarden Jahren nur aus einem Ozean von Kometenkernen und Asteroiden bestand. Diese sind durch viele Zusammenstöße miteinander verschmolzen und bildeten die heutigen Planeten. Das Bild unten zeigt die unterschiedlichen Entwicklungsphasen.



Vom Staub zum Planeten: Staubkörner wachsen zu Asteroiden und diese verschmelzen miteinander und bilden Planeten (Graphik SuW).

Warum gibt es Gesteins- und Gasplaneten im Sonnensystem? Als wahrscheinliche Ursache gilt die Nähe zur Sonne. Merkur, Venus, Erde und Mars konnten – wenn überhaupt - auf Grund ihrer Sonnennähe (hohe Temperatur und starker Sonnenwind) nur einen kleinen Teil der Gase aus der protoplanetaren Scheibe gravitativ an sich binden. Die heutigen riesigen Gasplaneten dagegen konnten in Sonnenferne mehr Gas aufsammeln (sie besitzen große Gesteinskerne) und dieses auch halten.

Kalte Objekte unseres Sonnensystems im MIR erforschen

Planeten sind im Visuellen beobachtbar, weil sie das Sonnenlicht reflektieren (sie sind selbst keine Quellen sichtbaren Lichts). Der nicht reflektierte Teil der Strahlung führt zur Erwärmung der Planetenoberfläche. Die Planeten geben diese Wärme als infrarotes Licht wieder ab. Wie viel Wärme abgestrahlt wird, hängt vom Material der Planetenoberfläche, seiner Oberflächenstruktur und seiner Temperatur ab.

Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen besitzen Temperaturen zwischen etwa 50 und vielen hundert Kelvin und strahlen somit am stärksten im MIR.

Die Venus, deren Atmosphäre zu 98% aus Kohlenstoffdioxid besteht (einem Treibhausgas), kann nicht so schnell wie die Erde ihre Wärme ins Weltall abgeben. Deswegen herrscht auf der Venusoberfläche eine Temperatur (Tag und Nacht) von fast 500 °C!

Das Bild zeigt den Marsmond Phobos im Gebiet des ca. 10 km großen Kraters Stickney im Visuellen. Ein mit einem Spektralphotometer gewonnenes Spektrum im MIR ermöglicht die Bestimmung der Oberflächentemperatur von Phobos, die im Schatten 161 K beträgt, auf der von der Sonne beschienenen Seite aber bei 269 K liegt (Umrechnung von Grad Fahrenheit in Kelvin, °F→K: $T_{\rm K} = (T_{\rm °F} + 459,67) \cdot \frac{5}{9}$).



Asteroid Ceres im Visuellen (links) und im MIR (rechts, Falschfarbenbild).



Weil auch Asteroiden im MIR am stärksten strahlen, sind Beobachtungen in diesem Spektralbereich sehr gut dazu geeignet, um nach ihnen Ausschau zu halten. Mit Hilfe von Infrarotbeobachtungen lassen sich die Durchmesser von Asteroiden bestimmen.

Auch der Staub, der im Schweif von Kometen vorhanden ist, strahlt stark im MIR. Das Bild rechts zeigt den Kometen Iras-Araki-Alcock, der mit dem Infrarot-Satellit IRAS entdeckt wurde. Das Falschfarbenbild zeigt seinen Schweif aus warmem Staub bei einer Wellenlänge von 25 µm (Bild: IRAS).



Aktivität 11: Das Holzkugelmodell der Erde

Mit einem Holzkugelmodell, einer Wärmelampe und einer Thermografie-Kamera könnt ihr die Absorption und Emission der Wärmestrahlung der Erde zeigen. Führt hierzu drei Versuche durch.

Aktivität 11.a:

Nimm die Holzkugel und halte sie für eine Minute nahe vor die strahlende Wärmelampe. Schalte dann das Zimmerlicht aus und beobachte die Holzkugel mit der Thermografie-Kamera. Beschreibe deine Beobachtungen hinsichtlich der Erwärmung der Kugeloberfläche.

Aktivität 11.b:

Wiederhole den Versuch, nachdem sich die Kugel abgekühlt hat. Drehe die Holzkugel aber diesmal langsam um eine Achse, die senkrecht zur Verbindungslinie Kugel - Lampe stehen soll. Schalte das Licht wieder aus und beobachte die Kugel mit der Thermografie-Kamera. Was hat sich im Vergleich zum vorhergehenden Versuch geändert?

Aktivität 11.c:

Wiederhole den Versuch abermals, nachdem sich die Kugel abgekühlt hat. Halte sie diesmal mit geneigter Drehachse (ähnlich der Erdachse) mit einer Neigung von ca. 23° im

Vergleich zur Lage zuvor. Einmal zeigt der obere Teil der Kugel zur Lampe, und einmal zeigt der untere Teil der Kugel zur Lampe. Was kannst du diesmal zur jeweiligen Erwärmung der Kugeloberfläche feststellen? Vergleiche die Holzkugel mit der Erde. Welche Tatsachen lassen sich demonstrieren?

Aktivität 11.d:

Informiere dich über die Temperaturen auf der Mondoberfläche. Begründe, warum die Temperaturunterschiede auf dem Mond viel größer sind als auf der Erde. Wie könnte diese Tatsache mit dem Holzkugelmodell gezeigt werden?









34

Anwendungen in der Astronomie 5: Das Rätsel der Planetenatmosphären oder wie ein Nachteil zum Vorteil wird

Im Abschnitt mit den Aktivitäten "Barrieren für das Infrarote – Absorption in der Erdatmosphäre") haben wir gesehen, dass die Absorption der IR-Strahlung durch Wasserdampf in der Atmosphäre ein großer Nachteil für erdgebundene IR-Beobachtungen ist.



Diese Absorption gelangt uns jedoch zum großen Vorteil, wenn wir die chemische Zusammensetzung der Atmosphären anderer Planeten bestimmen möchten. Es war lange Zeit nicht klar, aus welchen Stoffen die Atmosphären von Venus und Mars bestehen. Diese Informationen lieferten MIR-Beobachtungen. Das Bild links zeigt die MIR-Strahlung von Venus, Erde und Mars, aufgetragen Wellenlänge über der im Infrarotbereich. Die Einsenkungen in den gezeigten Kurvenverläufen der IR-Intensität (so genannte Absorptionslinien und -banden) entstehen bei Absorption des MIR durch Kohlenstoffdioxid-, Wasserund Ozonmoleküle der ieweiligen Planetenatmosphären.

Diese Absorptionsmerkmale werden auch genutzt, um die Zusammensetzung von Ringen um Planeten (z. B. Saturn, Uranus) oder von Kometenschweifen zu bestimmen.

Im MIR nach extrasolaren Planeten suchen

Eines der spannendsten Forschungsfelder der modernen Astronomie ist die Suche nach extrasolaren Planeten um Sterne der Milchstraße. Mit Hilfe indirekter Nachweismethoden wurden bisher mehr als 429 solcher "Exoplaneten" entdeckt (Stand: 26. 01. 2010). Der direkte Nachweis des Lichts extrasolarer Planeten gelang bisher nur in Ausnahmen. Er ist theoretisch im Infraroten viel Erfolg versprechender als im

sichtbaren Bereich, da der Helligkeitsunterschied zwischen Stern und Planet im IR deutlich geringer ist (rechtes Bild) als im Visuellen (Bild links, Bilder sind simuliert. Graphik SuW).



Anwendungen in der Astronomie 5: Das Rätsel der Planetenatmosphären

Die Entdeckungen von Exoplaneten bieten Anlass zu spannenden Verknüpfungen zur Biologie und zur Chemie. Am Ende steht die Frage nach eventuell existierendem Leben und den Möglichkeiten, dieses auf den fernen Welten nachweisen zu können.

Um die Atmosphäre eines Exoplaneten auf chemische Verbindungen zu untersuchen, wird sein IR-Spektrum analysiert. Genauso wie bei Venus oder Mars wird nach Absorptionsbanden und -linien gesucht, die wir als die "Fingerabdrücke" der Moleküle ansehen.



So wurde mit Hilfe des Spitzer-Teleskops (ein IR-Weltraumteleskop) Wasser auf einem nachgewiesen, Exo-Planeten der jedoch kein Gesteinsplanet sondern wie Jupiter ein Gasriese ist (siehe Bild unten rechts). Falls in Zukunft Ozon in der Atmosphäre eines Exoplaneten entdeckt wird, wäre dies ein Hinweis auf Leben auf diesem Planeten, weil freier Sauerstoff nur durch Leben (Algen, Pflanzen) erzeugt wird. Bild: Spitzer

Astronomie im Fernen Infrarot (FIR): Die Strahlung der kältesten Objekte



Im FIR sind fast alle Sterne unsichtbar, die sich in oder vor oder hinter kalten staubigen Gebieten befinden, weil sie im "Ozean" der FIR-Strahlung des kalten Staubs (Temperatur < 140 Kelvin bzw. -130 °C) "untergehen". Entsprechend sehen wir in der Scheibenregion des Milchstraßensystems vor allem ein großräumiges Leuchten des Staubs, wie es im Foto links unten zu sehen ist.

Das oberste Bild zeigt die galaktische Scheibe im Visuellen, wo der wolkig angeordnete Staub das Licht der Sterne erkennbar verfinstert. Die IR-Astronomie öffnet nun neue Fenster. Im NIR (mittleres Foto) erscheint der Staub beinahe schon durchsichtig. Im FIR tritt der Staub selbst als Strahlungsquelle auf. Das FIR-Bild der Galaxis ist aus drei Bildern zusammengesetzt, die bei den FIR-Wellenlängen 60, 100 und 240 Mikrometer vom COBE-Satelliten gemacht wurden. Noch beeindruckender ist das folgende Bild, welches das bekannte Sternbild Orion im Visuellen (links) und im FIR (rechts) zeigt. FIR-Beobachtungen ermöglichen die Bestimmung der genauen Masseverteilung und Dichte der Staubwolken.



© Michael Hauser (Space Telescope Science Institute), COBE/DIRBE Science Team und NASA.

Die abschließende Tabelle listet einige astronomische Objekte auf, die je nach ihrer Temperatur, in verschiedenen Infrarot-Spektralbereichen erforscht werden.

IR- Bereich	Wellenlängen (Mikrometer)	Temperaturen (Kelvin)	Was wir sehen
NIR	0,8 bis 5	3000 bis 600	Rote Riesen und Zwerge, Sterne mit zirkumstellaren Hüllen, Oberflächen von Planeten, Monden und Asteroiden, Objekte in und hinter Staubwolken, frühe (rotverschobene) Galaxien, Moleküle
MIR	5 bis 30	600 bis 150	Eigenstrahlung von Planeten, Kometen und Asteroiden, erwärmter Staub (z. B. in Form Protoplanetarer Scheiben), Sternentstehungsgebiete, Moleküle in Atmosphären und Molekülwolken (insbesondere biologisch relevante Moleküle wie H_2O , O_3 , CO_2), stark rotverschobene Galaxien, Staub ist transparent (nur nutzbar, wenn er kälter ist als ein durch ihn verdecktes Objekt)
FIR	30 bis 350	150 bis 10	Interstellarer (kalter) Staub, Moleküle in Molekülwolken, Frühphasen der Sternentstehung, Staub von ultraleucht- kräftigen Galaxien (Merger, Quasare, Starbursts), Staub ist transparent (nur nutzbar, wenn er kälter ist als ein durch ihn verdecktes Objekt)
submm	350 bis 1000	<10	Moleküle

5. SOFIAs Herz - das 17 Tonnen schwere Teleskop

Das Herzstück des SOFIA-Observatoriums, das 17 Tonnen schwere Spiegelteleskop mit einer freien Öffnung von etwa 2,5 m stellt den deutschen Beitrag zum Projekt dar.

Das Teleskop besteht aus einem parabolisch geformten Hauptspiegel (Durchmesser 2,7 m) aus Zerodur, einem Material mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten nahe Null. Der Sekundärspiegel (35 cm Durchmesser) aus Siliziumkarbid ist konvex geformt, was eine Verlängerung der Brennweite ermöglicht. Der Tertiärspiegel schließlich ist eben und lenkt den Strahlengang zum Instrument.

Ein Teleskop, das Triebwerksvibrationen, ständig sich ändernden Windlasten bei offenem Rolltor, unruhiger Flugbewegung und Kursänderungen ausgesetzt ist, für lange Zeit exakt auf ein Objekt auszurichten, stellt eine ingenieurtechnische Meisterleistung dar.



Für die dauerhafte Ausrichtung des Teleskops auf ein Objekt ist eine maximale Abweichung von 0,2 Bogensekunden (1 Bogensekunde = $1^{\circ}/3600$) gefordert. Diese Forderung ist mit folgender Situation vergleichbar: Ein Reiter auf einem galoppierenden Pferd soll mit seiner Pistole aus 25 km Entfernung eine Ein-Cent-Münze treffen.

Bei Start und Landung sowie am Boden wird das Teleskop durch ein Rolltor geschützt

und auf Betriebstemperatur von ca. -50°C gehalten.

Das Flugzeugsobservatorium SOFIA ist so flexibel, dass interessante kosmische Ereignisse an jedem beliebigen Punkt des Nachthimmels der Erde schnell beobachtet werden können. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, während der auf 20 Jahre angelegten Lebensdauer von SOFIA mit immer moderneren / weiterentwickelten Beobachtungsinstrumenten zu arbeiten.

Instrumente an Bord

Für den ersten Betriebszeitraum von SOFIA wurden 9 Instrumente bestimmt, von denen zwei (die Spektrometer *GREAT* und *FIFI LS*) aus Deutschland kommen. Das gesamte Observatorium wurde 2006 fertig gestellt, und der erste Flug fand im April 2007 statt. Nach einer ausführlichen Testphase sind die ersten wissenschaftlichen Messungen ab 2010 geplant.

Aktivität 12: Reflexion von Wärmestrahlen

Genauso wie sichtbares Licht wird auch die MIR-Strahlung reflektiert. Das folgende Experiment veranschaulicht dies. Dafür braucht ihr zwei Hohlspiegel, die ihr so aufstellt, dass ihre optischen Achsen auf einer gemeinsamen Geraden liegen (z. B. mit Hilfe einer optischen Bank). Die zwei Hohlspiegel haben je einen Radius von r = 19,5 cm und eine Scheiteltiefe von h = 6 cm.



Aktivität 12.a:

Welche Form hat der Hohlspiegel? Ist er Teil einer Sphäre oder bildet er einen Rotationsparaboloid? Das Ergebnis kann auf Grundlage der Vermessung eines Spiegelpunktes (x, y) im Abstand (x = 5 cm) von der optischen Achse ermittelt werden.

Aktivität 12.b:

Berechnet den Ort des Brennpunktes für die Fälle, dass der Hohlspiegel die Form eines Rotationsparaboloids oder eines Sphäroids hat. Um welches Maß weicht die Brennweite dieser Hohlspiegelarten voneinander ab?

Aktivität 12.c:

Die Lage des Brennpunktes könnt ihr experimentell prüfen. Dazu soll ein Hohlspiegel mit einer Lötkolbenspitze im Brennpunkt als Sender und ein weiterer Hohlspiegel mit einem Thermometer im Brennpunkt als Empfänger dienen. Die Messwerte zeichnet ihr auf.



Aktivität 13: SpiegeInde und diffuse Reflexion im MIR

Aktivität 13.a:

Ihr braucht eine Tasse mit heißem Tee, einen polierten Metallspiegel (ohne Glas!), eine matte Aluminiumplatte, d. h. mit oxidierter Oberläche, einen normalen Glasspiegel und eine Thermografie-Kamera. Betrachtet das durch eine ebene



Oberfläche (Metallspiegel, Glasspiegel, matte Aluminiumplatte) reflektierte Bild der Tasse zunächst mit bloßem Auge. Betrachte die Tasse anschließend erneut auf diesen Wegen durch die Thermografiekamera hindurch. Vergleicht die Ergebnisse, skizziert den Versuchsaufbau, beschreibt das Versuchsergebnis und versucht eine Erklärung. **Frage:** Warum spiegelt der Glasspiegel im IR schlechter als der im Visuellen ebenso gut

reflektierende polierte Metallspiegel?

Aktivität 13.b:

Das Phänomen der spiegelnden und der diffusen Reflexion soll anhand eines Analogieexperiments erklärt werden. Dazu stehen Tischtennisbälle und Volleybälle zur Verfügung. Wofür stehen diese Bälle in der Analogie? Wie könnte das Experiment aussehen?



Aktivität 13.c:

Ob wir ein Detail wie z. B. eine kleine Vertiefung in einem Gegenstand sehen, hängt auch von der Wellenlänge des Lichts ab, mit welchem dieser bestrahlt wird, damit wir ihn nach Reflexion sehen. Lord Rayleigh formulierte dazu ein sogenanntes Auflösungskriterium.

Welches Auflösungsvermögen α hätte das menschliche Auge, wenn α allein von der (beugenden) Eintrittsöffnung (Pupille, *D*=6 mm) abhängen würde? Wie groß ist das Auflösungsvermögen des Auges und wodurch wird es bestimmt?

Information - Physik

Wenn die Rauheit einer Oberfläche klein ist im Vergleich zur Wellenlänge der auftreffenden Strahlung (im Bild: A), dann erfolgt die Reflexion spiegelnd und die Fläche erscheint blank.

Sind die Unebenheiten einer Oberfläche dagegen größer als die Wellenlänge (im Bild: B), dann erscheint die Oberfläche matt, weil sie diffus (zerstreuend) reflektiert. Der Reflexionsgrad wird dann Albedo genannt.

Aktivität 14: SOFIAs Vibrationen und was aus ihnen wird

Der Betrieb eines Fernrohrs in einem Flugzeug erfordert vielfältige Maßnahmen zur Stabilisierung der Teleskopausrichtung. Vibrationen gehen sowohl von den Triebwerken als auch von der Luftströmung aus. Um die hochfrequenten Vibrationen zu dämpfen, kommt ein Luftfedersystem mit selbstlöschendem Elastomer (ein spezieller Gummi) zum Einsatz (Bilder: NASA/DSI).

Aktivität 14.a:

Vergleiche eine Kugel aus Elastomer mit einer aus normalem Gummi hinsichtlich ihres Dämpfungsvermögens. Lasse dazu beide Vollgummibälle aus gleicher Höhe auf einen glatten harten Untergrund fallen. Beschreibe deine Beobachtungen.

•

Aktivität 14.b:

Die Energie, die der Ball aus dem Gravitationsfeld erhält, wird beim Aufprall umgewandelt (Lageenergie \rightarrow kinetische Energie \rightarrow thermische Energie). **Berechne** die Temperatur, um die sich der unelastisch stoßende Gummiball (*m* = 20 g, c_{Gummi} = 1,4 kJ/(kg·K)) beim Aufprall aus 2 m Höhe erwärmt?

Aktivität 14.c: Überlege dir ein Experiment, bei welchem dem Elastomer-Ball so viel mechanische Energie zugeführt wird, dass er beim (mehrmaligen) Aufprall für die Thermografie-Kamera merklich erwärmt wird (im Vergleich zum normalen Gummiball).

Information – Astronomie: Wohin mit der Gravitationsenergie? Wenn kosmische Objekte auf Grund der Eigengravitation oder der Gravitationswechselwirkung mit anderen Objekten kompakter werden, dann wird immer thermische Energie frei. Sie stammt aus ihrem freien Fall oder bei sehr langsamer Schrumpfung direkt aus ihrer potentiellen Energie. So erhöht sich die Temperatur eines Protosterns bis zum

Zünden des Wasserstoffs. Die Kerne vieler Planeten sind noch flüssig, u. a.

weil beim Zusammenprall vieler Planetesimale diese stark erhitzt werden. Die kompakten Endprodukte der Sternentwicklung können Materie ansaugen und in Akkretionsscheiben sammeln, welche sich durch das Aufprallen von dazu kommender Materie aufheizen.

6. Lösungen und Ergebnisse zu den Aktivitäten

Aktivität 1	Das Herschel-Ex	periment selbst	durchführen
-------------	------------------------	-----------------	-------------

Zeit (min)	Temperatur (°C) Blau	Temperatur (°C) Grün	Temperatur (°C) IR
Anfang			
1 min			
2 min			
3 min			
4 min			
5 min			

Da die Dispersion von Prismenspektren nicht linear ist (siehe Information zur Physik: "sie dehnen gegen Blau und raffen gegen Rot"), ist die "Wellenlängendichte" im grünen Bereich des Spektrums geringer als im Infraroten. Mehr einfallende Strahlungsenergie bedeutet mehr Energieeintrag, also eine stärkere Temperaturerhöhung.

Auch die Absorption der Strahlung durch das Thermometer und seine Füllung kann verschieden stark sein.

0 L 350

450

550

Wellenlänge λ / nm

650

Aktivität 2. Das "Spektrino" (Visualisierungsmodell zum Spektrum)

Aktivität 2.a

0.0

350

400

450

550

Wavelength (nm)

500

650

600

700

750

Die Strahlung einer LED ist nicht auf die Temperatur des Strahlers zurückzuführen, wie es bei einer Glühlampe der Fall ist. Sie hängt allein von ihren Halbleitereigenschaften ab. Während die Glühlampe als sogenannter Temperaturstrahler ein kontinuierliches Spektrum erzeugt, gibt eine LED das Licht in mehr oder weniger breiten Banden ab.

Oben: Ansichten durch ein Handspektroskop: Kontinuierliches Glühlichtspektrum im Vergleich zum Bandenspektrum einer LED, unten: spektrale Energieverteilungen für Glühlicht und für LEDs

750

Aktivität 2.b

Die Bildsensoren der Handykameras (CCD oder CMOS) sind im Gegensatz zum menschlichen Auge empfindlich für NIR-Strahlung und etwas UV-Strahlung (siehe Diagramm links).

Aktivität 2.c

- Woher kommt der Faktor 873? Sichtbares Licht: 380 - 780 nm , IR-Bereich: 780 - 350.000 nm Also: $\frac{350.000 \text{ nm} - 780 \text{ nm}}{780 \text{ nm} - 380 \text{ nm}} \approx \underline{873}$
- Maßstab des Spektrinos: 5 nm \rightarrow 2mm Also: $\frac{350.000 \text{ nm} - 780 \text{ nm}}{5 \text{ nm}} \cdot 2 \text{ mm} \approx \underline{140.000 \text{ mm}}$

10 ² nm	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
	↓ ↓			↓ I

Die Bereichsgrenzen (die Exponenten zur Basis 10) werden durch Logarithmieren bestimmt: z. B. log(380) ≈ 2,6 380 nm ≈ $10^{2,6}$ nm, 780 nm ≈ $10^{2,9}$ nm, 350.000 nm ≈ $10^{5,5}$ nm

Aktivität 3: Die Fernbedienung – ein NIR-Strahler im Wohnzimmer

Aktivität 3.a:

Handykameras sind auch im sehr kurzwelligen NIR-Bereich empfindlich (CCD- oder CMOS-Bildempfänger). Deswegen können damit die NIR-Leuchtdioden des Spektrinos und der Fernbedienung sichtbar gemacht werden.

Aktivität 3.b:

Das Signal der Fernbedienung kannst du wie einen sichtbaren Lichtstrahl durch Reflexion oder Brechung in seiner Ausbreitungsrichtung ändern. Für die Reflexion ist eine die NIR-Strahlung spiegelnde Oberfläche wichtig.

Aktivität 3.c

Die dargestellte Zeitachse umfasst einen Zeitraum von etwa 9 ms. In dieser Zeitspanne werden 8 Pulse ausgesendet. In einer Sekunde werden also 1000/9⋅8≈889 Pulse ausgesendet. Dies entspricht gleichzeitig der Frequenz: f=889 Hz (der junge Mensch hört Schallfrequenzen von 16 bis etwa 20.0000 Hz). Dieser Ton wird immer wieder unterbrochen, wenn die Pulsfolge endet und dann erneut gesendet wird.

Aktivität 4: NIR-Licht hörbar machen

Aktivität 4.a:

Der Frequenzbereich des Sehens (380 nm bis 780 nm) reicht von ca. 3,8·10¹⁴ Hz bis ca. 7,9·10¹⁴ Hz. Hörbare Schallwellen haben Frequenzen zwischen 16 Hz und 20 kHz.

Die Frequenzbereiche sind deutlich verschieden. Zwei Töne mit dem Frequenzverhältnis zwischen tiefem und hohem Ton von 1:2 erscheinen uns ähnlich. Sie bilden eine Oktave. Der Frequenzbereich des **Hörens** (16 Hz – 20 kHz) umfasst **rund 10 Oktaven**.

 $16 \cdot 2^{\mathsf{x}} = 20.000 \rightarrow \mathsf{x}?$

 $\log_2(20.000 / 16) \approx \log_2(1250) = \log_{10}(1250) / \log_{10}(2) \approx \log_{10}(1250) / 0,3 \approx 10,3$ Der Frequenzbereich des Sehens enthält etwa eine Oktave (3,8 : 7,9). Der Frequenzbereich des Infraroten (ca. 0,8 – 350 µm), d. h. von ca. 8,6·10¹¹ Hz bis ca. 3,8·10¹⁴ Hz umfasst rund 9 Oktaven.

Aktivität 4.b:

Die Frequenz der Pulsfolge der Fernbedienung entspricht etwa der des Kammertons a" (880 Hz).

Aktivität 4.c:

Wohlklang Quinte: 3 : 2 Grundton Rot (710 nm/4,22 · 10¹⁴ Hz) → (6,34 · 10¹⁴ Hz/473 nm) Ton Blau Wohlklang Quarte: 4 : 3 Grundton Rot (710 nm/4,22 · 10¹⁴ Hz) → (7,03 · 10¹⁴ Hz/426 nm) Ton Violett-Blau Missklang Septime: 15 : 8 Grundton Rot (710 nm/4,22 · 10¹⁴ Hz) → (7,91 · 10¹⁴ Hz/379 nm) Ton Tiefviolett Missklang Sekunde: 9 : 8 Grundton Rot (710 nm/4,22 · 10¹⁴ Hz) → (4,75 · 10¹⁴ Hz/632 nm) Ton Rot-Orange

Aktivität 5. Emission von Licht, Emissionsprozesse und Termschema

Aktivität 5.a:

Durch Vergleich der Lichtfarben kann auf eine Wellenlänge im grünen Bereich geschlossen werden (λ =550 nm).

Je länger das (aufgeladene) Indikatorfeld mit NIR-Licht bestrahlt wird, desto schwächer wird das sichtbare Signallicht.

Aktivität 5.b

$$E_{550nm} = E_{NIR}$$

$$h \cdot f_{550nm} = 2 \cdot h \cdot f_{NIR}$$

$$c = \lambda \cdot f \quad \rightarrow \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

$$h \cdot \frac{c}{\lambda_{550nm}} = 2 \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda_{NIR}}$$

$$\lambda_{NIR} = \lambda_{550nm} \cdot 2$$

$$\lambda_{NIR} = 550 \text{ nm} \cdot 2 = \underline{1100 \text{ nm}}.$$

Aktivität 6: Eigenschaften der NIR-Strahlung - Reflexion

Pflanzen

Viele natürliche Materialien reflektieren deutlich anders im NIR als im Visuellen. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass der spektrale (auf die Wellenlänge bezogene) Reflexions-grad von grünen Pflanzen mit Erreichen des NIR stark anwächst (> 700 nm). Das ist auf die spezifischen Reflexions-merkmale des zellulären Blatt-gefüges und der internen Was-serversorgung zurückzuführen. Beide sind bei geschädigter absterbender oder Vegetation oft gestört und wirken sich so auf den Reflexionsgrad der Pflanze Besonders wichtig sind die aus. Blattpigmente Chlorophyll A und B mit

unterschiedlichen Reflexionsgraden im Bereich zwischen 400 und 700 nm. Das Maß der Reflexion im IR ist also ein Vitalitätsfaktor.

Ein Sicherheitsmerkmal von Geldscheinen ist ihr Reflexionsvermögen im NIR. Auf der Vorderseite des 10-Euro-Scheins erscheint zum Beispiel nur die Hälfte des abgebildeten Tors aus der Romanik und der Folienstreifen (Foto rechts). Dies weist auf die Echtheit des Geldscheins hin.

Die Venen in den Armen werden sichtbar, weil das NIR tiefer in die Haut bis zu den Blutgefäßen eindringt.

Pupillen erscheinen dann weiß, wenn die

Testperson direkt in die Kamera blickt

(ansonsten erscheinen sie dunkel). Die starke Reflexion der NIR-Strahlung stammt von der Hornhaut des Auges. Eine NIR-Überwachungskamera besteht aus dem eigentlichen Kamerateil zur Bildaufnahme und aus einem Teil zur Bestrahlung der Umgebung mit NIR-Licht.

Aktivität 7: Eigenschaften der NIR-Strahlung – Transmission und Absorption

Im NIR-Licht ist Cola viel durchsichtiger!

In Cola ist Zuckercouleur enthalten, die durch Sulfonierung in sauren Getränken (wie der Cola) die Emulsion stabilisiert. Cola stellt also eine Emulsion dar, eine Flüssigkeit mit kleinsten Tröpfchen einer anderen Flüssigkeit, die mit dem Licht wechselwirken können.

Aktivität 8.b: Koordinatenbestimmung

Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68 (VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)

ESO PR Photo 02b/01 (10 January 2001)

Da die Modellsterne im Dunkelwolkenmodell nach eigenem Ermessen angeordnet werden können, wird im Folgenden nur eine Musterlösung gezeigt, bei der die Modellsterne entsprechend sehr heller Sterne in der Dunkelwolke angeordnet wurden (siehe Tabelle unten).

Die absoluten Pixelpositionen wurden mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms "Paint" ermittelt. Die Werte in Klammern sind absolute Positionen (bezogen auf das Foto), die Werte ohne Klammern beziehen sich auf das eingeführte Koordinatensystem.

C European Southern Obse

Stern	Abstand zum Referenzstern	Abstand zum Referenzstern	α	δ
Nr.*	1	2	(h min s)	(° ' ")
	in α-Richtung	in δ-Richtung		
	(mm oder Pixel)	(mm oder Pixel)		
1	0	348 Pixel	17 ^h 23 ^{min} 23 ^s	-23° 50' 43"
	(23 Pixel)	(420 Pixel)		
2	596 Pixel	0	17 ^h 23 ^{min} 6 ^s	-23° 48' 31"
	(619 Pixel)	(72 Pixel)		
3	524 Pixel	299 Pixel	≈-16,9 s	≈+113"
	(547 Pixel)	(371 Pixel)	17 ^h 23 ^{min} 6,1 ^s	-23° 50' 24"
4	409 Pixel	145 Pixel	≈-13,2 s	≈+55"
	(432 Pixel)	(217 Pixel)	17 ^h 23 ^{min} 9,8 ^s	-23° 49' 26"
5	324 Pixel	157 Pixel	≈-10,5 s	≈+60"
	(347 Pixel)	(229 Pixel)	17 ^h 23 ^{min} 12,5 ^s	-23° 49' 31"
6	275 Pixel	395 Pixel	≈-8,9 s	≈+150"
	(298 Pixel)	(467 Pixel)	17 ^h 23 ^{min} 14,1 ^s	-23° 51' 01"
7	74 Pixel	532 Pixel	≈-2,4 s	≈+202"
	(97 Pixel)	(604 Pixel)	17 ^h 23 ^{min} 20,6 ^s	-23° 51' 53"

In α -Richtung entsprechen 596 Pixel einem Unterschied $\Delta \alpha$ von 17 s.

1 Pixel macht entsprechend 17/526=0,032319 s aus.

In δ -Richtung entsprechen 348 Pixel einem Unterschied $\Delta\delta$ von 132".

1 Pixel macht entsprechend 132/348=0,37931" aus.

Aktivität 9: Emission von MIR-Strahlung

Aktivität 9.a:

Brillengläser erscheinen dunkel, wenn sie kälter als das Gesicht sind, weil Glas im MIR stark absorbiert.

Aktivität 9.b:

Die Spuren der warmen Hände erscheinen auf dem Tisch, weil die Tischoberfläche durch die Hände erwärmt wird und an den Auflageflächen entsprechend mehr Wärmestrahlung abgibt.

Aktivität 9.c:

Die kalte Flasche absorbiert Wärme von den Wangen, so dass diese an der Berührungsfläche abkühlt und folglich weniger MIR-Strahlung abgibt.

Aktivität 9.d:

Im Gegensatz zu sichtbarem Licht durchdringt die Wärmestrahlung die Mülltüte oder den Luftballon mit nur geringer Absorption.

Aktivität 10: Barrieren für das Infrarote – Absorption in der Erdatmosphäre

Aktivität 10.a:

	Luft	Wasser
Auge (visuell)	Strahlung ohne große Beeinträchtigung nachweisbar (sichtbar)	Strahlung ohne große Beeinträchtigung nachweisbar (sichtbar)
Hand (MIR)	Strahlung ohne große Beeinträchtigung nachweisbar (fühlbar)	Strahlung nicht mehr nachweisbar (fühlbar)

Aktivität 10.b:

Die Abschätzung beruht auf der Grundgleichung der Wärmelehre:

 $W = m \cdot c \cdot \Delta \mathcal{G}_{\perp}$

Neben der Temperaturdifferenz $\Delta \mathcal{G}$ und der spezifischen Wärmekapazität c wird noch die Wassermasse benötigt.

Es wird davon ausgegangen, dass das Wasser überall im Gefäß die gleiche Temperatur hat. Auch wird angenommen, dass das Thermometer beinahe sofort die aktuelle Temperatur des Wassers anzeigt.

Aktivität 10.c:

Für (harmonische) Feder gilt: $T \sim \frac{1}{\sqrt{D}}$ (*T* ... Schwingungsdauer, *D* ... Federkonstante)

	Lichtwelle und Wassermolekül	Erdbebenwelle und Dämpfungselement
kurzwellig	Dehnungsschwingungen	Feder mit großer Federkonstante D (harte Feder)
mittelwellig	Biegeschwingungen	
langwellig	Drehschwingungen / Drehungen	Feder mit kleiner Federkonstante D (weiche Feder)

Aktivität 11: Das Holzkugelmodell der Erde

Aktivität 11.a:

Ein kreisförmiges Gebiet der Holzkugel wird erwärmt, wobei die Stärke der Erwärmung vor allem vom Auftreffwinkel der Strahlung auf die Kugelober-fläche abhängt. Die stärkste Erwärmung passiert bei senkrechter Bestrahlung beim "Kugeläquator".

Aktivität 11.b:

Die Erwärmung verteilt sich diesmal entlang der Äquator-zone. Die nicht mehr von der Lampe beschienenen Teile dieser Zone kühlen nur noch ab bis sie infolge der Rotation wieder ins Licht der geraten. Mit Lampe der Thermografie-Kamera kann man einen er-wärmten Streifen rund um die Kugel beobachten, der dort am meisten strahlt (noch am wärmsten ist), wo er zuletzt von der Lampe bestrahlt wurde.

Aktivität 11.c:

Der diesmal erwärmte Oberflächenstreifen der Kugel folgt wegen der gekippten Kugelachse nicht mehr dem Kugeläquator, sondern, er läuft um den Verkippungswinkel geneigt zu diesem. Es fällt auf, dass der größere Teil des Streifens auf der Halbkugel (obere oder untere) liegt, die der Lampe zugeneigt ist. Die Entstehung der Jahreszeiten, insbesondere die Tatsache der größeren Energiezufuhr für eine Erdhalbkugel, lässt sich so demonstrieren.

Aktivität 11.d:

Die Temperaturen auf der Mondoberfläche erreichen bis zu etwa 130 °C auf der Tagseite und fallen in der Nacht bis auf etwa –160 °C. Im Gegensatz zur Erde (die ja beinahe genau so weit von der Sonne entfernt ist) besitz der Mond keine Atmosphäre und eine sehr langsame Rotation (ca. 27 Tage), was den krassen Temperaturunterschied erklärt.

Die stärkere Auskühlung der nicht beschienenen Kugelseite bei langsamer Rotation lässt sich mit dem Holzkugelmodell und der Thermografiekamera sofort zeigen. Die Atmosphäre müsste ins Modell noch eingebracht werden. Dazu könnte man diese mit Folie einwickeln.

Aktivität 12: Reflexion von Wärmestrahlen

Aktivität 12.a:

Im Abstand von x = 5 cm von der optischen Achse beträgt die Tiefe des Punktes bei einem **Paraboloid:**

$$y = 6 \text{ cm} - a \cdot x^2 = 6 \text{ cm} - \frac{0.01578}{\text{ cm}} \cdot 5^2 \text{ cm}^2 \approx 5.6 \text{ cm}.$$

Im Abstand von x = 5 cm von der optischen Achse beträgt die Tiefe des Punktes bei einem **Sphäroid**:

$$y = 6 \text{ cm} \cdot \left(-\sqrt{r^2 - x^2} + R\right) = 6 \text{ cm} \cdot \left(-\sqrt{34, 7^2 \text{ cm}^2 - 5^2 \text{ cm}^2} + 34, 7 \text{ cm}\right) \approx 6,4 \text{ cm}.$$

Die Messung entscheidet nun.

Aktivität 12.b:

Im Falle eines Rotationsparaboloids gilt:

$$y = a \cdot x^2 \implies a = \frac{y}{x^2} = \frac{6 \text{ cm}}{19,5^2 \text{ cm}^2} \approx \frac{0,01578}{\text{ cm}}$$

Der Brennpunkt liegt dann bei $\frac{1}{4a} \approx 15,8 \text{ cm}.$

Im Falle eines Sphäroids gilt:

$$y = -\sqrt{r^2 - x^2} + R \implies R = \frac{y^2 + x^2}{2y} = \frac{(6 \text{ cm})^2 + (19,5 \text{ cm})^2}{2 \cdot 6 \text{ cm}} \approx 34,7 \text{ cm}.$$

Der Brennpunkt ist dann bei etwa 17,3 cm. Die Brennweiten unterscheiden sich um ca. 1,5 cm.

Aktivität 12.c:

Das Bild zeigt die Vermessung der Brennweite für NIR-Strahlung. Die Brennweite wurde mit Hilfe eines Thermometers ermittelt, dass schrittweise entlang der optischen Achse verschoben wurde.

Aktivität 13: SpiegeInde und diffuse Reflexion im MIR

Aktivität 13.a:

Die raue Metallplatte spiegelt die MIR-Strahlung gut wider, weil die MIR-Strahlung eine relativ große Wellenlänge hat und von den Unebenheiten der rauen Metallplatte nicht zerstreut wird. Nur Licht mit kleineren Wellenlängen wird zerstreut. Das erklärt, warum die Platte im Visuellen matt erscheint.

Der Glasspiegel spiegelt zwar sehr gut, verschluckt in der Glasschicht aber sehr viel Strahlung.

Aktivität 13.b:

Folgende **Analogie** ist möglich:

Ein Volleyball, den man z. B. auf eine Waschbetonplatte (leicht raue Oberfläche) wirft, prallt von dieser entsprechend dem Reflexionsgesetz (spiegelnd) ab. Ein Tischtennisball dagegen prallt (diffus) in nicht vorhersehbare Richtung ab, weil er schon die Unebenheiten "spürt".

Der Volleyball steht in der Analogie für die Wellenlänge der MIR-Strahlung, der Tischtennisball für die Wellenlänge von visuellem Licht.

Aktivität 13.c: Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Das Auflösungskriterium von Lord Rayleigh lautet:

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (\alpha \text{ im Bogenmaß})$$

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{0,006 \text{ m}} \approx 1,12 \cdot 10^{-4} \rightarrow \alpha^{\circ} \approx 0,0064^{\circ} \approx 23^{''}.$$

Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges liegt bei etwa 2'. Begrenzt wird die Auflösung jedoch durch die Rasterung der Sehzellen in der Netzhaut.

Aktivität 14: SOFIAs Vibrationen und was aus ihnen wird

Aktivität 14.a:

Die Kugel aus normalem Gummi (für Flummis) wird vom Fußboden reflektiert (**elastischer Stoß**) und springt wieder in die Höhe. Nur ein geringer Teil der mechanischen Energie geht dabei verloren.

Die Kugel aus dem selbstverlöschen-den (spezieller Elastomer Gummi zur Schwingungsdämpfung) springt fast nicht zurück (unelastischer Stoß). Ihre mechanische Energie wird in Wärme umgesetzt. Die Erwärmung von Dämpfungselementen aus Gummi sollte einkalkuliert werden. Der Gummi wird bei zu großer Beanspruchung zerstört.

Aktivität 14.b:

Wir stellen fest: Die Masse spielt für die Rechnung keine Rolle, wenn wir

annehmen: Der gesamte Ball wandelt die mechanische Energie beim Stoß in Wärme um.

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot c_{Gummi} \cdot \Delta T$$
$$\Delta T = \frac{g \cdot h}{c_{Gummi}} = \frac{9,81 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot g \cdot \text{K}}{\text{s}^2 \cdot 1,4 \text{ J}} = \frac{9,81 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot g \cdot \text{K}}{\text{s}^2 \cdot 1400 \frac{g \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}} = \underline{0,014 \text{ K}}.$$

Aktivität 14.c:

Eine Möglichkeit:

Schleudert die jeweils in einem dünnen Netz gehaltenen Bälle mittels einer etwa 1 m langen am Netz befestigten Schnur 50 mal mit großer Wucht auf den harten glatten Fußboden. Dies sollte für beide Bälle gleichzeitig geschehen (mit zwei Netzen). Das Netz dient dazu, den Ball von der warmen Hand zu trennen.

Legt nach dem Schleudern beide Bälle nebeneinander und betrachtet sie mit der Thermografiekamera

7. Literaturquellen zu SOFIA

SOFIA oder warum die Astronomen in die Luft gehen, Krabbe, A., Titz, R., Röser, H-P, Sterne und Weltraum, 12/1999, S.1052

Das SOFIA-Projekt -- neue Perspektiven für Forschung und Bildung, Fischer, O., Titz, R., in Astronomie+Raumfahrt im Unterricht 5/1999, S. 37

Deutsches SOFIA Institut gegründet, Althaus, T., Sterne und Weltraum, 4/2005, S. 14

Astronomie in luftigen Höhen, Scorza, C., 2008, Sterne und Weltraum, 7/2008, S.

SOFIA – Die Sternwarte über den Wolken, Scorza, C., in Astronomie und Raumfahrt im Unterricht, 10/2009, S.15

Information zum SOFIA: www.dsi.uni-stuttgart.de

<u>Kontakt:</u>

Dr. Cecilia Scorza Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit Deutsches SOFIA Institut <u>scorza@dsi.uni-stuttgart.de</u> Tel. 06221-528291