minærva

AS 6

SKRIPT

Licht aus dem All

Erklärskript

Die Aufgaben 169–202 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Astronomie – Klasse 7 bis Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe AS · Astronomie (Klasse 7 bis Kursstufe)

AS1 Himmel	**AS2** Erde und Mond	**AS3** Sonnensystem	**AS4** Sonne	**AS5** Himmelsmechanik
AS6 Licht aus dem All	**AS7** Planeten und Leben	**AS8** Sterne	**AS9** Sternentwicklung	**AS10** Kosmos

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Astronomie: zehn Themenskripte AS1–AS10 von Klasse 7 bis zur Kursstufe mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan der Stoff stammt (Physik, IMP, Basisfach Astrophysik, Wahlfach Astronomie) oder ob er Zusatz ist.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht **4**
1 Astronomie als Beobachtungswissenschaft **5**
1.1 Beobachten statt experimentieren 5
1.2 Wie astronomisches Wissen entsteht 5
1.3 Modelle in der Astronomie 6
2 Das elektromagnetische Spektrum **8**
2.1 Licht als elektromagnetische Welle 8
2.2 Das Spektrum im Überblick 8
2.3 Die Fenster der Atmosphäre 9
3 Teleskope und Detektoren **11**
3.1 Wozu ein Teleskop? 11
3.2 Das Linsenteleskop 11
3.3 Das Spiegelteleskop 12
3.4 Lichtsammelvermögen 12
3.5 Auflösungsvermögen und Seeing 13
3.6 Radio- und Weltraumteleskope 14
3.7 Detektoren und Bildgebung 15
4 Spektroskopie und Doppler-Effekt **16**
4.1 Der Spektrograph 16
4.2 Drei Arten von Spektren 16
4.3 Was Spektren verraten 17
4.4 Der Doppler-Effekt 17
4.5 Nur die Radialgeschwindigkeit 18
5 Andere Boten: Teilchen und Gravitationswellen **19**
5.1 Kosmische Strahlung 19
5.2 Neutrinos 19
5.3 Gravitationswellen 19
5.4 Mehrere Boten zugleich 21
6 Signallaufzeit und Blick in die Vergangenheit **22**
6.1 Licht braucht Zeit 22
6.2 Blick in die Vergangenheit 23
6.3 Rückblickzeit und Entfernung 23

Worum es geht

Kein Mensch war je auf einem Stern, keine Sonde hat einen Stern erreicht, und keine wird es in absehbarer Zeit tun. Trotzdem wissen wir, wie heiß die Sterne sind, woraus sie bestehen, wie schnell sie sich bewegen und wie sie sterben. Möglich ist das, weil die Himmelskörper uns ständig Botschaften schicken: vor allem Licht im weitesten Sinn, also elektromagnetische Wellen vom Radio- bis zum Gammabereich, dazu Teilchen und seit 2015 nachweisbar auch Gravitationswellen.

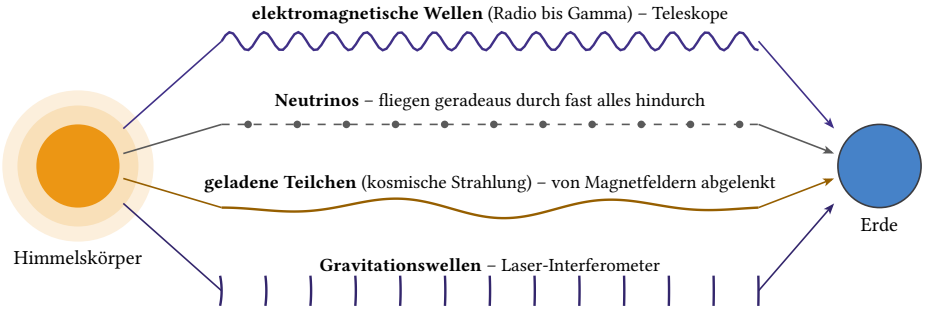


Abbildung 83: Boten aus dem All (schematisch). Jeder Bote verlangt eigene Instrumente und erzählt etwas anderes über seine Quelle.

Dieses Skript zeigt, wie Astronomen diese Botschaften auffangen und lesen. Kapitel 1 klärt, wie eine Wissenschaft arbeitet, die ihre Gegenstände nur beobachten, aber nicht anfassen kann, und welche Rolle Modelle dabei spielen. Kapitel 2 stellt das elektromagnetische Spektrum vor und zeigt, welche Teile davon überhaupt durch die Lufthülle kommen. Kapitel 3 erklärt Teleskope und Detektoren, Kapitel 4 die Spektroskopie und den Doppler-Effekt. Kapitel 5 behandelt die anderen Boten: Neutrinos, kosmische Strahlung und Gravitationswellen. Kapitel 6 schließlich zeigt, dass jeder Blick ins All ein Blick in die Vergangenheit ist.

Licht aus dem All im Lehrplan. Stufe: Kursstufe. Welcher Plan welchen Abschnitt verlangt, sagen die Marken unter den Überschriften. Der Stoff gehört zu den Denk- und Arbeitsweisen des Wahlfachs Astronomie und des Physik-Basisfachs mit Schwerpunkt Astrophysik. Wer in Klasse 10 Wellen und Optik kennt, kann das Skript gut mitlesen; Spektrallinien und Spektralklassen der Sterne stehen ausführlich im Skript AS8.

Quellen-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan Baden-Württembergs der Stoff stammt: Physik 7/8 | IMP 8 | IMP 9 | IMP 10 für die Mittelstufe (Physik und Profilfach IMP), Basisfach Astrophysik | Wahlfach Astronomie für die Kursstufe (Physik-Basisfach mit Schwerpunkt Astrophysik, Wahlfach Astronomie). Zusatz heißt: Der Abschnitt steht in keinem dieser Pläne, gehört aber in anderen Ländern zum Pflichtstoff Astronomie (Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen) und ist hier Bonus.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit Verweisen auf passende Übungen in **noctua** und Stationen in **fabrica**. Fachbegriffe sind beim ersten Auftreten **fett** gesetzt und am Ende jedes Kapitels in einem Kasten zusammengefasst.

1 Astronomie als Beobachtungswissenschaft

1.1 Beobachten statt experimentieren

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

In der Physik und der Chemie prüft man eine Vermutung meist im **Experiment**: Man stellt die Bedingungen selbst her, verändert eine Größe gezielt und misst, was passiert. Mit einem Stern geht das nicht. Man kann ihn weder erhitzen noch wiegen noch in eine andere Umgebung bringen; selbst die Planeten des Sonnensystems erreicht man nur mit jahrelangen Raumfahrtmissionen. Die Astronomie ist deshalb eine **Beobachtungswissenschaft**: Sie nimmt, was der Himmel von sich aus schickt, misst es so genau wie möglich und erklärt es mit den Gesetzen der Physik und der Chemie.

Definition

Die Astronomie ist eine **Beobachtungswissenschaft**. Sie untersucht Himmelskörper über die **Boten**, die von ihnen zur Erde gelangen:

- **elektromagnetische Wellen** aller Wellenlängen (Radiowellen, Infrarot, sichtbares Licht, Ultraviolett, Röntgen- und Gammastrahlung),
- **Teilchen** (Neutrinos, Atomkerne der kosmischen Strahlung, Teilchen des Sonnenwinds, Meteoriten),
- **Gravitationswellen**.

Ihre Werkzeuge sind **Bildgebung** (wo ist etwas, wie sieht es aus?) und **Spektroskopie** (wie verteilt sich die Strahlung auf die Wellenlängen?), ihre Instrumente **Teleskope** und **Detektoren**.

Dass das funktioniert, beruht auf einer starken Annahme: **Die Naturgesetze gelten überall im Universum gleich.** Ein Natriumatom in einer Sternatmosphäre verschluckt Licht derselben Wellenlänge wie im Labor in Heidelberg, die Gravitation wirkt in einer fernen Galaxie wie im Sonnensystem. Diese Annahme ist nicht einfach geglaubt, sondern wird ständig überprüft – und hat sich bisher immer bewährt. So hat man im Licht ferner Quasare dieselben Linienmuster gefunden wie im Labor, nur alle um denselben Faktor verschoben (Kapitel 4).

Wie viel man allein aus Licht lernen kann, unterschätzten selbst kluge Köpfe. Der französische Philosoph Auguste Comte schrieb 1835, die chemische Zusammensetzung der Sterne werde man niemals erfahren. Keine 25 Jahre später erklärten Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen die dunklen Linien im Sonnenspektrum – und damit lag die Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre offen (Skript AS8).

1.2 Wie astronomisches Wissen entsteht

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Beobachten allein ist noch keine Wissenschaft. Erst wenn man eine Beobachtung erklärt und aus der Erklärung etwas **Neues** vorhersagt, das man prüfen kann, entsteht belastbares Wissen. Aussagen der Physik und der Astronomie müssen deshalb grundsätzlich **empirisch überprüfbar** sein: Es muss eine Beobachtung geben, die sie widerlegen könnte.

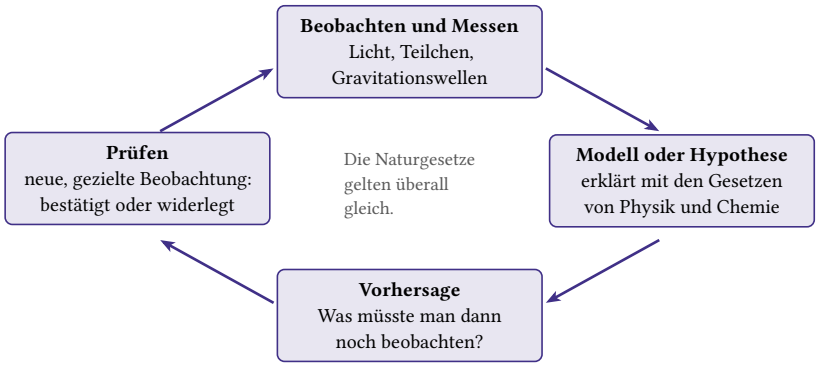


Abbildung 84: Der Weg zur Erkenntnis in der Astronomie. Statt eines Experiments steht am Ende eine neue, gezielte Beobachtung.

Beispiel 1

Die Entdeckung des Neptun. Nach der Entdeckung des Uranus (1781) zeigte sich über Jahrzehnte, dass er nicht genau dort stand, wo ihn das Gravitationsgesetz vorhersagte (**Beobachtung**). Urbain Le Verrier vermutete einen unbekannten, weiter außen kreisenden Planeten, der Uranus anzieht (**Hypothese**), und berechnete, wo dieser Planet stehen müsste (**Vorhersage**). Am 23. September 1846 fand Johann Gottfried Galle an der Berliner Sternwarte den Neptun nicht einmal ein Grad neben der vorhergesagten Stelle (**Prüfung**).

Ein zweites Beispiel: Albert Einstein sagte 1916 mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie Gravitationswellen voraus. Fast hundert Jahre lang waren sie zu schwach, um gemessen zu werden. Erst am 14. September 2015 fingen die beiden LIGO-Detektoren in den USA ein Signal auf, das genau zur Vorhersage für zwei verschmelzende Schwarze Löcher passte (Kapitel 5). Hätte man trotz ausreichender Messgenauigkeit nichts gefunden, wäre die Theorie in Schwierigkeiten gewesen.

Astronomie und nicht empirische Weltdeutungen

Die Astrologie behauptet, die Stellung der Planeten im Tierkreis bei der Geburt präge den Charakter eines Menschen. Solche Behauptungen lassen sich prüfen – und in sorgfältigen Untersuchungen hat sich kein Zusammenhang gezeigt. Wer an der Aussage trotzdem festhält und jede Widerlegung wegerklärt, verlässt den Boden der empirischen Wissenschaft. Mehr dazu im Skript AS2.

1.3 Modelle in der Astronomie

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Weil man Himmelskörper nicht direkt untersuchen kann, arbeitet die Astronomie besonders stark mit **Modellen**. Ein Modell ist eine vereinfachte Vorstellung, die wichtige Eigenschaften eines Ausschnitts der Wirklichkeit wiedergibt und unwichtige weglässt. Ein Sternmodell beschreibt den Stern als Gaskugel, in der sich Gasdruck und Schwerkraft die Waage halten (Skript AS9); ein Planetenmodell beschreibt die Bahnen mit den Keplerschen Gesetzen (Skript AS5).

Merksatz

Modelle

- erklären Beobachtungen und machen **Vorhersagen**, die man prüfen kann;
- haben einen **Gültigkeitsbereich**: Sie funktionieren unter bestimmten Bedingungen gut und versagen außerhalb davon;
- werden verbessert oder ersetzt, wenn Beobachtungen ihnen widersprechen. Ein Modell ist nicht „wahr“ oder „falsch“, sondern mehr oder weniger brauchbar.

Weltbilder als Modelle. Die großen Weltbilder der Geschichte sind Modelle des ganzen Kosmos. Das **geozentrische Weltbild** (Ptolemäus, um 150 n. Chr.) stellt die Erde in die Mitte und erklärte die Planetenbewegung mit Kreisen auf Kreisen erstaunlich genau. Das **heliozentrische Weltbild** (Kopernikus 1543) stellt die Sonne in die Mitte; durchgesetzt hat es sich erst, als Galilei mit dem Fernrohr 1610 die vollständige Phasenfolge der Venus sah und Kepler die Bahnen als Ellipsen beschrieb (Skript AS3). Für die drehbare Sternkarte benutzt man übrigens bis heute ein geozentrisches Modell: Für den Anblick des Himmels von der Erde aus ist es das einfachste.

Ähnlich ging es dem Universum als Ganzem. Einstein entwarf 1917 ein **statisches Universum**, das sich weder ausdehnt noch zusammenzieht. Alexander Friedmann und Georges Lemaître zeigten in den 1920er-Jahren, dass Einsteins eigene Gleichungen auch ein **dynamisches**, sich ausdehnendes Universum zulassen, und Edwin Hubble fand 1929, dass sich die fernen Galaxien umso schneller entfernen, je weiter weg sie sind. Daraus entstand das Modell vom **Urknall**, das heute durch viele Beobachtungen gestützt wird, etwa durch die kosmische Hintergrundstrahlung (Skript AS10).

Modelle des Lichts. Auch für das Licht selbst braucht man mehrere Modelle, je nachdem, was man erklären will:

Modell	erklärt gut	versagt bei
Strahlenmodell	Strahlengang in Linsen- und Spiegelteleskopen, Schatten, Finsternisse	Beugung: Es sagt beliebig feine Bilder voraus, also keine Auflösungsgrenze
Wellenmodell	Beugung und Auflösungsgrenze, Interferenz am Gitter, Doppler-Effekt	Detektoren, die einzelne Lichtportionen zählen; Fotoeffekt
Photonenmodell	Energie $E = h \cdot f$, Linienspektren, Detektoren (CCD)	Interferenz und Beugung, die erst viele Photonen zusammen zeigen

Tabelle 29: Drei Modelle des Lichts und ihre Gültigkeitsbereiche.

Typischer Fehler

Falsch: Das heliozentrische Weltbild hat bewiesen, dass das geozentrische falsch ist; ein Modell ist entweder richtig oder falsch.

Richtig: Modelle werden an ihrer Leistung gemessen: Welche Beobachtungen erklären sie, welche Vorhersagen treffen sie? Das heliozentrische Modell erklärt mehr und einfacher – etwa die Venusphasen –, aber auch es ist nur ein Modell mit Gültigkeitsbereich: Die Sonne ist nicht der Mittelpunkt des Universums.

Fachbegriffe: Experiment · Beobachtungswissenschaft · Boten · Bildgebung · Spektroskopie · Teleskop · Detektor · empirisch überprüfbar · Hypothese · Vorhersage · Modell · Gültigkeitsbereich · geozentrisches Weltbild · heliozentrisches Weltbild · statisches Universum · dynamisches Universum · Urknall

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Strahlen, Wellen, Photonen: Modelle des Lichts** ↗ · **Keplersche Gesetze** ↗



2 Das elektromagnetische Spektrum

2.1 Licht als elektromagnetische Welle

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Licht ist eine **elektromagnetische Welle**: ein elektrisches und ein magnetisches Feld, die senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Anders als Schall braucht sie keinen Träger; sie läuft auch durch das Vakuum zwischen den Sternen, und zwar immer mit der **Lichtgeschwindigkeit** c. Wie bei jeder Welle hängen Wellenlänge λ und Frequenz f über die Ausbreitungsgeschwindigkeit zusammen.

Merksatz

Elektromagnetische Wellen im Vakuum

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{mit} \quad c = 2{,}998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3{,}00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Die Lichtgeschwindigkeit ist eine **Naturkonstante**: Sie ist für alle Wellenlängen und für jeden Beobachter gleich.

Beispiel 2

Neutrale Wasserstoffatome im All senden Radiostrahlung der Frequenz $f = 1420\ \text{MHz}$ aus. Ihre Wellenlänge ist

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}420 \cdot 10^9\ \text{Hz}} \approx 0{,}21\ \text{m} = 21\ \text{cm}\ .$$

Diese **21-cm-Linie** verrät, wo in der Milchstraße kaltes Wasserstoffgas liegt (Kapitel 4).

Licht als Strom von Photonen. Bei der Wechselwirkung mit Materie – etwa im Detektor – verhält sich Licht wie ein Strom von Energieportionen, den **Photonen**. Ein Photon der Frequenz f trägt die Energie

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{mit der Planckschen Konstante} \quad h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}\ .$$

Kurzwellige Strahlung besteht also aus energiereichen Photonen. Ein Photon grünen Lichts ($\lambda = 500\ \text{nm}$) trägt

$$E = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5{,}00 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} \approx 4{,}0 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}5\ \text{eV}\ ,$$

ein Röntgenphoton mit $\lambda = 0{,}1\ \text{nm}$ das Fünftausendfache. (Ein Elektronenvolt, $1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$, ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen der Spannung 1 V gewinnt.)

2.2 Das Spektrum im Überblick

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Das sichtbare Licht ist nur ein winziger Ausschnitt aus dem **elektromagnetischen Spektrum**, das von Radiowellen mit Wellenlängen von vielen Metern bis zu Gammastrahlung mit Wellenlängen unter einem Billionstel Meter reicht. Physikalisch sind alle diese Strahlungsarten dasselbe; sie unterscheiden sich nur in Wellenlänge, Frequenz und Photonenenergie.

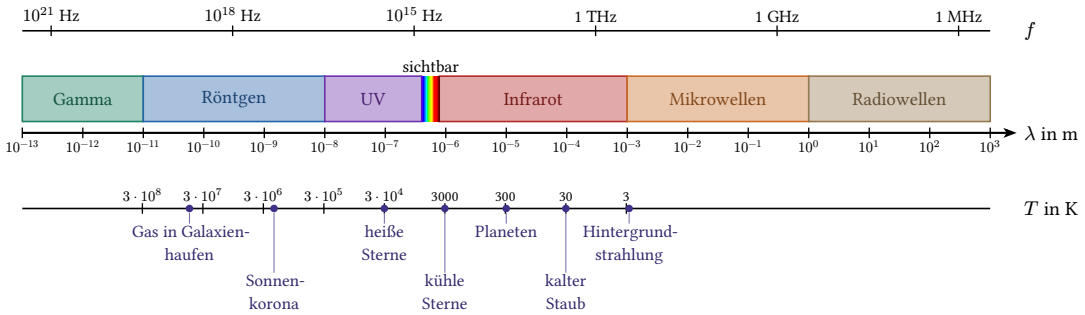


Abbildung 85: Das elektromagnetische Spektrum (logarithmische Achsen). Oben die Frequenz, in der Mitte die Wellenlänge. Unten: Bei welcher Temperatur ein Körper am stärksten bei dieser Wellenlänge strahlt (Wiensches Verschiebungsgesetz $\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$), mit typischen Beispielen.

Welcher Bereich für ein Himmelsobjekt wichtig ist, hängt vor allem von seiner Temperatur ab. Jeder Körper sendet Wärmestrahlung aus, deren Maximum nach dem **Wienschen Verschiebungsgesetz** $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$ mit $b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}$ m · K bei umso kürzeren Wellenlängen liegt, je heißer er ist (Skript AS8). Dazu kommen Strahlungsarten, die nichts mit Wärme zu tun haben, etwa die Radiostrahlung schneller Elektronen in Magnetfeldern oder die Gammastrahlung aus Kernprozessen.

Bereich	Wellenlänge	typische Quellen im All
Radiowellen	über 1 m	schnelle Elektronen in Magnetfeldern (Pulsare, Kerne aktiver Galaxien), Jupiter
Mikrowellen	1 mm bis 1 m	kosmische Hintergrundstrahlung (2,7 K), 21-cm-Linie des Wasserstoffs, Moleküle in kalten Gaswolken
Infrarot	780 nm bis 1 mm	kalter Staub, entstehende Sterne, kühle Sterne und Braune Zwerge, Planeten, sehr ferne Galaxien
sichtbares Licht	380 nm bis 780 nm	Sterne, leuchtende Gasnebel, von Sternen beleuchtete Planeten und Monde
Ultraviolett	10 nm bis 380 nm	heiße junge Sterne, Weiße Zwerge, Chromosphäre der Sonne
Röntgen	10 pm bis 10 nm	Gas mit Millionen Kelvin: Sonnenkorona, Gas in Galaxienhaufen, Materie, die in Schwarze Löcher stürzt
Gamma	unter 10 pm	Supernovae, Pulsare, Gammastrahlenausbrüche, Kernreaktionen

Tabelle 30: Bereiche des Spektrums und typische Quellen (Grenzen fließend, gerundet).

Beispiel 3

Das Gas zwischen den Galaxien eines Galaxienhaufens hat Temperaturen um $5 \cdot 10^7$ K. Seine Wärmestrahlung hat das Maximum bei

$$\lambda_{\max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \text{m K}}{5 \cdot 10^7\ \text{K}} \approx 6 \cdot 10^{-11}\ \text{m} = 0{,}06\ \text{nm}$$

– im Röntgenbereich. Galaxienhaufen sind deshalb helle Röntgenquellen, obwohl man das Gas im sichtbaren Licht gar nicht sieht.

Jeder Bereich zeigt also eine andere Seite des Universums. Erst seit der Mitte des 20. Jahrhunderts beobachtet man außerhalb des sichtbaren Lichts: Karl Jansky entdeckte 1932 Radiostrahlung aus der Milchstraße, seit 1962 kennt man Röntgenquellen außerhalb des Sonnensystems, und seit 1967 Gammastrahlenausbrüche. Man spricht von **Multiwellenlängen-Astronomie**, wenn man ein Objekt in vielen Bereichen zugleich untersucht.

2.3 Die Fenster der Atmosphäre

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Für die Astronomie vom Boden aus gibt es ein großes Hindernis: Die Lufthülle lässt nur einen Teil des Spektrums durch.

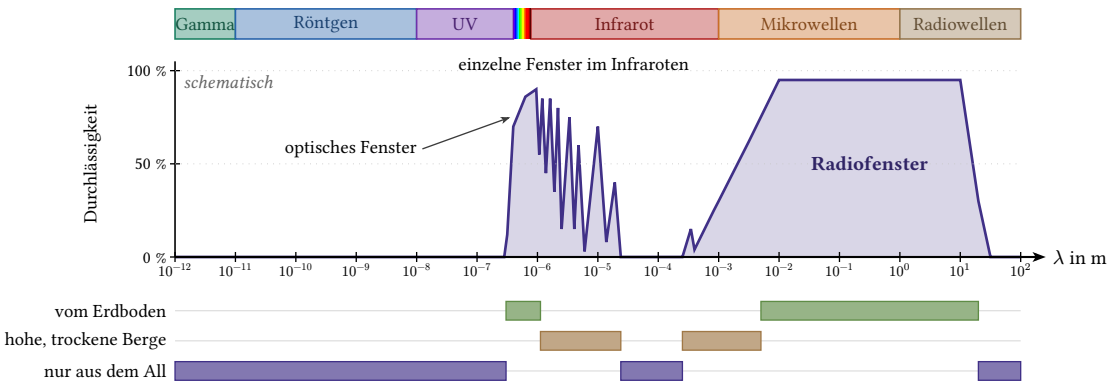


Abbildung 86: Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für senkrecht einfallende Strahlung (schematisch, Fenster gerundet). Darunter: von wo aus man in welchem Bereich beobachten kann.

- **Gamma- und Röntgenstrahlung** werden schon in großer Höhe von den Gasen der Atmosphäre verschluckt. Am Erdboden kommt davon nichts an – zum Glück für das Leben.
- **Ultraviolett** unter etwa 300 nm verschluckt vor allem die **Ozonschicht** in 15 bis 35 km Höhe.

- Das **optische Fenster** reicht von etwa 300 nm bis 1 µm: das sichtbare Licht und etwas nahes UV und Infrarot. Es ist kein Zufall, dass unsere Augen genau hier empfindlich sind.
- Im **Infraroten** verschlucken vor allem Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid die Strahlung. Es gibt nur einzelne schmale Fenster, die sich auf hohen, trockenen Bergen nutzen lassen.
- Das **Radiofenster** reicht von etwa 1 cm bis etwa 20 m. Noch längere Wellen werden von der elektrisch leitenden **Ionosphäre** (in 60 bis 1000 km Höhe) zurückgeworfen.

Merksatz

Atmosphärische Fenster

Vom Erdboden aus kann man nur im **optischen Fenster** und im **Radiofenster** gut beobachten, in Teilen des Infraroten von hohen, trockenen Bergen aus. Für Gamma-, Röntgen- und den größten Teil der Ultraviolett- und Infrarotstrahlung braucht man Teleskope im Weltraum.

Darum stehen die großen optischen Teleskope auf hohen Bergen in trockenem Klima, etwa in der Atacama-Wüste in Chile oder auf dem Mauna Kea auf Hawaii, über dem größten Teil des Wasserdampfs und weit weg von Stadtlicht. Radioteleskope können dagegen fast überall stehen und auch bei Wolken und am Tag beobachten. Röntgen- und Gammateleskope arbeiten ausschließlich auf Satelliten.

Typischer Fehler

Falsch: Radioteleskope hören Geräusche aus dem All.

Richtig: Radioteleskope empfangen elektromagnetische Wellen, genau wie ein Rundfunkempfänger – nur aus dem All. Schall dagegen braucht Luft oder einen anderen Stoff und kann sich im leeren Weltraum nicht ausbreiten.

Manchmal werden Radiosignale nachträglich hörbar gemacht; das ist eine Darstellungsform, kein Geräusch.

⋆ Sterne am Horizont

Vergleiche an einem klaren Abend die Helligkeit eines hellen Sterns kurz nach seinem Aufgang knapp über dem Horizont mit seiner Helligkeit Stunden später, wenn er hoch steht (zum Beispiel Sirius im Winter im Südosten). Nahe am Horizont durchläuft das Licht einen viel längeren Weg durch die Luft, wird stärker geschwächt, flackert stärker und erscheint oft rötlich – aus demselben Grund, aus dem die untergehende Sonne rot ist. Hilfsmittel: keines; eine Sternkarten-App hilft beim Finden.

Fachbegriffe: elektromagnetische Welle · Lichtgeschwindigkeit · Wellenlänge · Frequenz · Naturkonstante · Photon · Plancksche Konstante · 21-cm-Linie · elektromagnetisches Spektrum · Wiensches Verschiebungsgesetz · Multiwellenlängen-Astronomie · atmosphärisches Fenster · optisches Fenster · Radiofenster · Ozonschicht · Ionosphäre

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Elektromagnetisches Spektrum** ↗ · **Absorption in der Atmosphäre** ↗ · **Farbe und Temperatur** ↗



3 Teleskope und Detektoren

3.1 Wozu ein Teleskop?

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Als Galileo Galilei 1609 sein selbst gebautes Fernrohr auf den Himmel richtete, sah er Krater auf dem Mond, vier Monde beim Jupiter und unzählige Sterne in der Milchstraße, die dem bloßen Auge verborgen bleiben. Viele glauben, ein Teleskop sei vor allem zum Vergrößern da. Wichtiger sind zwei andere Aufgaben:

Merksatz

Die Aufgaben eines Teleskops

a) **Licht sammeln:** Die große Öffnung fängt viel mehr Licht auf als die Pupille des Auges. So werden schwache Objekte sichtbar.
b) **Feine Einzelheiten trennen:** Je größer die Öffnung, desto kleinere Winkel kann das Teleskop auflösen.
c) Erst an dritter Stelle steht das **Vergrößern**, und auch nur beim Blick durch ein Okular.

Der wichtigste Kennwert eines Teleskops ist deshalb der **Durchmesser** D seines Objektivs oder Hauptspiegels, nicht seine Vergrößerung.

3.2 Das Linsenteleskop

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Ein **Linsenteleskop** (**Refraktor**) besteht im einfachsten Fall aus zwei Sammellinsen. Das **Objektiv** mit der großen Brennweite f_1 sammelt das Licht. Weil die Sterne praktisch unendlich weit entfernt sind, fällt das Licht eines Sterns als paralleles Bündel ein und wird in der **Brennebene** des Objektivs zu einem Punkt vereinigt: Dort entsteht ein kleines, umgekehrtes **Zwischenbild**. Dieses betrachtet man mit dem **Okular**, einer Lupe mit kleiner Brennweite f_2. Steht das Zwischenbild in der Brennebene des Okulars, verlassen die Strahlen das Okular wieder parallel – aber unter einem größeren Winkel.

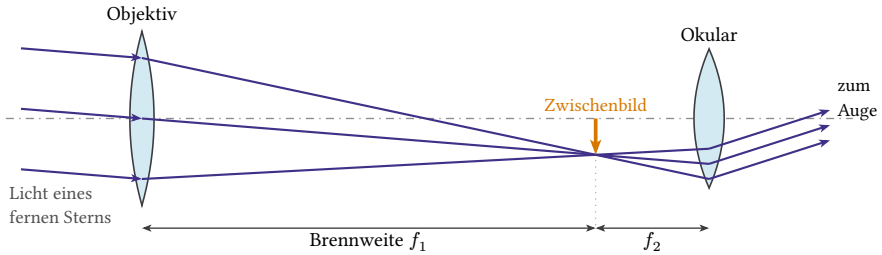


Abbildung 87: Strahlengang im Linsenteleskop (Kepler-Fernrohr) für das Licht eines Sterns, der etwas über der optischen Achse steht. Das Licht tritt unter dem um $\frac{f_1}{f_2}$ größeren Winkel aus. Winkel übertrieben.

Merksatz

Vergrößerung eines Fernrohrs mit Objektivbrennweite f_1 und Okularbrennweite f_2:

$$V = \frac{f_1}{f_2}.$$

Ein Teleskop mit $f_1 = 1000$ mm vergrößert mit einem 20-mm-Okular 50-fach, mit einem 5-mm-Okular 200-fach. Sinnvoll ist höchstens etwa das Doppelte des Objektivdurchmessers in Millimetern; stärkere Vergrößerung zeigt keine neuen Einzelheiten mehr, sondern nur ein größeres, verwaschenes Bild.

Linsen haben einen grundsätzlichen Nachteil: Glas bricht blaues Licht etwas stärker als rotes. Blaues und rotes Licht haben deshalb verschiedene Brennpunkte, und helle Sterne bekommen farbige Säume (**Farbfehler**). Man mildert das mit Objektiven aus mehreren Linsen verschiedener Glassorten. Außerdem muss eine Linse am Rand gehalten werden und biegt sich unter ihrem eigenen Gewicht durch. Das größte je gebaute Linsenteleskop, das der Yerkes-Sternwarte bei Chicago (1897), hat ein Objektiv von 1,02 m Durchmesser – größer baut man Linsenteleskope nicht.

3.3 Das Spiegelteleskop

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Im **Spiegelteleskop** (**Reflektor**) übernimmt ein gekrümmter **Hauptspiegel** die Aufgabe des Objektivs. Damit er paralleles Licht genau in einem Punkt sammelt, muss er die Form eines **Paraboloids** haben. Isaac Newton baute 1668 das erste brauchbare Spiegelteleskop. Bei seiner Bauart lenkt ein kleiner ebener **Fangspiegel** den Lichtkegel kurz vor dem Brennpunkt zur Seite aus dem Rohr, wo man durch das Okular schaut oder eine Kamera anbringt.

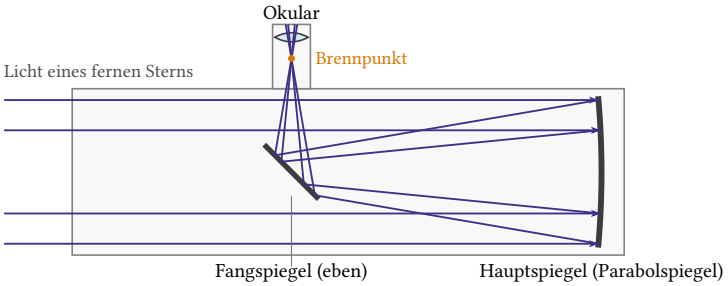


Abbildung 88: Strahlengang im Newton-Teleskop. Der Parabolspiegel vereinigt parallel einfallendes Licht im Brennpunkt; der Fangspiegel unter 45° verlegt den Brennpunkt seitlich neben das Rohr. Berechnet für einen Spiegel mit 5,6 Einheiten Brennweite.

Große Forschungsteleskope sind meist in der Bauart nach **Cassegrain** gebaut: Ein gewölbter Fangspiegel wirft das Licht durch ein Loch in der Mitte des Hauptspiegels zurück, hinter dem die Instrumente sitzen. Spiegel haben gegenüber Linsen entscheidende Vorteile:

- Licht wird an der Spiegeloberfläche reflektiert, nicht gebrochen. Es gibt **keinen Farbfehler**, und man kann vom Ultravioletten bis ins Infrarote beobachten.
- Ein Spiegel lässt sich von hinten auf seiner ganzen Fläche abstützen und sogar aus vielen Einzelteilen (**Segmenten**) zusammensetzen.
- Nur eine Fläche muss genau geschliffen werden, und das Glas muss nicht durchsichtig sein.

Teleskop	Durchmesser	seit	Besonderheit
Yerkes-Refraktor (USA)	1,02 m	1897	größtes Linsenteleskop
Hale-Teleskop, Mount Palomar (USA)	5,1 m	1948	jahrzehntelang das größte Spiegelteleskop
Keck I und II, Mauna Kea (Hawaii)	je 10 m	1993, 1996	Spiegel aus 36 sechseckigen Segmenten
Very Large Telescope (VLT), Paranal (Chile)	4 × 8,2 m	ab 1998	Europäische Südsternwarte ESO; vier Teleskope, die man zusammenschalten kann
Extremely Large Telescope (ELT), Armazones (Chile)	39 m	im Bau	ESO; Hauptspiegel aus fast 800 Segmenten

Tabelle 31: Einige große optische Teleskope (gerundet, nach Angaben der Betreiber).

3.4 Lichtsammelvermögen

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Wie viel Licht ein Teleskop auffängt, hängt von der Fläche seiner Öffnung ab, also von $A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$. Doppelter Durchmesser bedeutet vierfache Fläche und damit viermal so viel Licht.

Merksatz

Lichtsammelvermögen: Die gesammelte Lichtmenge wächst mit dem Quadrat des Öffnungsdurchmessers:

$$\frac{E_{\text{Teleskop}}}{E_{\text{Auge}}} = \left(\frac{D_{\text{Teleskop}}}{D_{\text{Auge}}} \right)^2 .$$

Mit dem Helligkeitsunterschied $\Delta m = 2{,}5 \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$ (Skript AS8) folgt, um wie viele Magnituden schwächere Sterne man noch sieht.

Beispiel 4

Die Pupille des dunkeladaptierten Auges ist bis zu 7 mm weit. Ein einzelnes Teleskop des VLT ($D = 8{,}2$ m) sammelt

$$\left(\frac{8200\ \text{mm}}{7\ \text{mm}}\right)^2 \approx 1170^2 \approx 1{,}4 \cdot 10^6$$

mal so viel Licht. Das entspricht $\Delta m = 2{,}5 \cdot \lg(1{,}4 \cdot 10^6) \approx 15$ mag. Wo das bloße Auge unter dunklem Himmel bis etwa 6 mag kommt, käme man mit dem Auge am VLT bis etwa 21 mag. Mit einer Kamera, die stundenlang belichtet, erreicht man noch viel schwächere Objekte.

Der zweite Weg zu mehr Licht ist die **Belichtungszeit**. Das Auge sammelt Licht nur etwa eine Zehntelsekunde lang, eine Kamera dagegen Minuten oder Stunden. Darum zeigen Himmelsaufnahmen viel mehr als jeder Blick durchs Okular, auch durch ein großes Teleskop.

3.5 Auflösungsvermögen und Seeing

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Nach dem Strahlenmodell müsste ein perfektes Teleskop einen Stern als winzigen Punkt abbilden. Tatsächlich ist das Licht eine Welle und wird an der kreisrunden Öffnung gebeugt. Jeder Stern erscheint deshalb als kleines **Beugungsscheibchen** mit schwachen Ringen. Zwei Sterne, die sehr dicht beieinander stehen, verschmelzen zu einem Fleck.

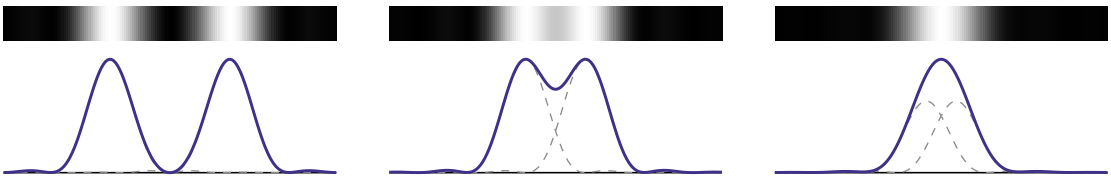


Abbildung 89: Zwei gleich helle Sterne im Teleskop: Helligkeitsverlauf quer durch die Bilder (berechnet aus dem Beugungsmuster einer Kreisöffnung), darüber das Bild. Gestrichelt die beiden Einzelsterne. Beim Grenzwinkel α fällt das Maximum des einen Sterns auf das erste Minimum des anderen.

Merksatz

Auflösungsvermögen: Ein Teleskop mit dem Öffnungsdurchmesser D kann bei der Wellenlänge λ zwei Punkte gerade noch trennen, wenn sie mindestens den Winkel

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

auseinander stehen. Umrechnung: $1\ \text{rad} \approx 206\,265''$.

- Größere Öffnung: feinere Einzelheiten.
- Längere Wellenlänge: gröbere Einzelheiten. Radioteleskope müssen deshalb riesig sein.

Beispiel 5

Ein Schulteleskop mit $D = 20$ cm löst bei $\lambda = 550$ nm den Winkel

$$\alpha = 1{,}22 \cdot \frac{5{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}}{0{,}20\ \text{m}} \approx 3{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{rad} \approx 0{,}69''$$

auf. Das Hubble-Weltraumteleskop ($D = 2{,}4$ m) kommt auf $0{,}058''$. Das Radioteleskop Effelsberg ($D = 100$ m) erreicht bei der 21-cm-Linie nur

$$\alpha = 1{,}22 \cdot \frac{0{,}21\ \text{m}}{100\ \text{m}} \approx 2{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{rad} \approx 9'$$

– trotz seiner Größe etwa so grob wie das bloße Auge.

Seeing. Vom Erdboden aus bleibt ein großes Teleskop weit hinter seinem Auflösungsvermögen zurück. Die Luft ist ständig in Bewegung; Schichten verschiedener Temperatur brechen das Licht unterschiedlich und lenken es hin und her. Mit bloßem Auge sieht man das als **Funkeln** der Sterne, im Teleskop als zitterndes, verschwommenes Sternbildchen. Diese Luftunruhe heißt **Seeing**. Sie begrenzt die Schärfe in Mitteleuropa meist auf $1''$ bis $3''$, an den besten

Bergstandorten auf etwa 0,5″. Ein Teleskop von 20 cm Durchmesser ist damit fast schon so scharf, wie es die Luft zulässt; ein 8-m-Spiegel wäre ohne Hilfe nicht schärfer.

Zwei Auswege gibt es: Man bringt das Teleskop über die Atmosphäre (Weltraumteleskope), oder man gleicht die Luftunruhe aus. Bei der **adaptiven Optik** misst ein Sensor ständig, wie das Bild eines hellen Sterns – oder eines mit einem Laser künstlich erzeugten „Sterns“ in 90 km Höhe – verzerrt wird, und ein verformbarer Spiegel gleicht die Störung bis zu tausendmal in der Sekunde aus.

⋆ Mizar und Alkor: ein Test für Auge und Fernrohr
Der mittlere Deichselstern des Großen Wagens, Mizar, hat einen schwachen Nachbarn, Alkor, knapp 12′ entfernt. Wer gute Augen hat, trennt die beiden mit bloßem Auge (das Auge löst etwa 1′ auf). Im kleinen Fernrohr ab etwa 50-facher Vergrößerung zerfällt Mizar selbst in zwei Sterne, die 14″ auseinander stehen. Der Große Wagen ist in Deutschland das ganze Jahr über zu sehen, im Frühjahr abends hoch im Norden. Achte auch auf das Funkeln: An Abenden mit starkem Funkeln wirken die Sternbildchen im Fernrohr unruhig.

Typischer Fehler
Falsch: Je stärker ein Teleskop vergrößert, desto mehr sieht man.
Richtig: Was ein Teleskop zeigt, hängt von Öffnung (Licht und Auflösung) und Luftunruhe ab. Über die sinnvolle Vergrößerung hinaus wird das Bild nur größer und dunkler, aber nicht schärfer.

Billige Fernrohre werben gern mit „500-facher Vergrößerung“; bei 6 cm Öffnung ist sinnvoll höchstens gut 100-fach.

3.6 Radio- und Weltraumteleskope

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Radioteleskope sammeln Radiowellen mit großen Metallschüsseln – weil die Wellenlängen lang sind, darf die Oberfläche ein paar Millimeter von der Idealform abweichen. Das vollbewegliche Radioteleskop Effelsberg in der Eifel (100 m, seit 1972) gehört zu den größten der Welt; das chinesische FAST (500 m, seit 2016) liegt fest in einer natürlichen Mulde. Um trotz der langen Wellenlängen fein aufzulösen, schaltet man viele Antennen zusammen (**Interferometrie**). Das Auflösungsvermögen hängt dann vom größten Abstand B der Antennen ab: $\alpha \approx \frac{\lambda}{B}$. ALMA in der Atacama-Wüste besteht aus 66 Antennen in 5000 m Höhe. Das **Event Horizon Telescope** verbindet Radioteleskope rund um die Erde und hat so die Auflösung eines erdgroßen Teleskops; 2019 zeigte es das erste Bild vom Schatten eines Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87.

Weltraumteleskope sind von Luftunruhe, Wetter und den Fenstern der Atmosphäre unabhängig.

Teleskop	Start	Bereich	Kennzeichen
Hubble-Weltraumteleskop (NASA, ESA)	24.04.1990	UV, sichtbar, nahes IR	2,4-m-Spiegel in gut 500 km Höhe; ein Schliff-Fehler wurde 1993 von Astronauten korrigiert
Chandra (NASA)	1999	Röntgen	Röntgenstrahlung fällt sehr flach auf ineinandergeschachtelte Spiegel
Gaia (ESA)	19.12.2013	sichtbar	vermaß bis Anfang 2025 Orte, Bewegungen und Parallaxen von fast zwei Milliarden Sternen (Skript AS8)
James-Webb-Weltraumteleskop (NASA, ESA, CSA)	25.12.2021	Infrarot	6,5-m-Spiegel aus 18 vergoldeten Segmenten; arbeitet 1,5 Millionen km von der Erde entfernt hinter einem Sonnenschild, der es auf unter 50 K kühlt

Tabelle 32: Einige Weltraumteleskope (nach Angaben von NASA und ESA).

Das James-Webb-Teleskop beobachtet im Infraroten, weil man dort durch Staubwolken hindurch in entstehende Sterne schauen kann, weil kühle Objekte wie Planeten dort am hellsten sind und weil das Licht der fernsten Galaxien durch die Ausdehnung des Universums ins Infrarote verschoben ist (Skript AS10). Damit seine eigene Wärmestrahlung nicht stört, muss es sehr kalt sein.

3.7 Detektoren und Bildgebung

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Bis ins 19. Jahrhundert war das Auge der einzige **Detektor**. Ab etwa 1880 setzte sich die **Fotoplatte** durch: Sie konnte lange belichtet werden und hielt das Gesehene fest, nutzte aber nur wenige Prozent des einfallenden Lichts. Heute arbeiten fast alle optischen Teleskope mit **CCD-Sensoren** oder verwandten Halbleitersensoren, wie sie auch in Handykameras stecken. Ein CCD besteht aus Millionen lichtempfindlicher Bildpunkte (**Pixel**). Jedes einfallende Photon löst dort mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Elektron aus (Fotoeffekt); die Elektronen werden gesammelt und am Ende der Belichtung gezählt.

Merksatz

Vorteile elektronischer Detektoren: Sie nutzen bis über 90 % der Photonen (**Quanteneffizienz**), die Fotoplatte nur wenige Prozent. Die Zahl der Elektronen ist proportional zur Lichtmenge, man kann also genau messen. Die Daten liegen sofort digital vor und lassen sich am Computer auswerten, addieren und vergleichen.

Für andere Bereiche braucht man andere Detektoren: Im fernen Infrarot und bei Millimeterwellen misst man die winzige Erwärmung eines gekühlten Absorbers (**Bolometer**), im Radiobereich verstärkt ein Empfänger die Wechselspannung, die die Welle in der Antenne erzeugt, und im Röntgenbereich zählt der Detektor jedes einzelne Photon samt seiner Energie.

Bildgebung. Ein CCD misst nur Helligkeiten, keine Farben. Farbbilder entstehen, indem man nacheinander durch verschiedene Filter belichtet und die Aufnahmen am Computer in Rot, Grün und Blau übereinanderlegt. Viele Aufnahmen werden außerdem addiert, um schwache Objekte aus dem Rauschen herauszuholen, und mit Bildern einer gleichmäßig beleuchteten Fläche korrigiert.

Falschfarbenbilder

Bilder im Röntgen-, Ultraviolett-, Infrarot- oder Radiobereich zeigen Strahlung, die das Auge gar nicht sieht. Damit man sie betrachten kann, ordnet man den Wellenlängen sichtbare Farben zu: meist die kürzeste Wellenlänge Blau, die längste Rot. Die berühmten Bilder des James-Webb-Teleskops sind solche **Falschfarbenbilder**. Sie sind keine Fälschung, aber auch kein Abbild dessen, was ein Mensch vor Ort sähe. Wissenschaftlich ausgewertet werden die gemessenen Zahlenwerte, nicht die Farben.

Fachbegriffe: Linsenteleskop (Refraktor) · Objektiv · Brennebene · Zwischenbild · Okular · Vergrößerung · Farbfehler · Spiegelteleskop (Reflektor) · Hauptspiegel · Fangspiegel · Lichtsammelvermögen · Beugungsscheibchen · Auflösungsvermögen · Seeing · adaptive Optik · Radioteleskop · Interferometrie · Weltraumteleskop · Fotoplatte · CCD-Sensor · Pixel · Quanteneffizienz · Bolometer · Falschfarbenbild

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Bilder mit Linsen** ↗ · **Auflösungsvermögen** ↗ · **Spalt, Doppelspalt und Gitter** ↗



4 Spektroskopie und Doppler-Effekt

4.1 Der Spektrograph

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Ein Bild zeigt, **wo** Licht herkommt. Viel mehr verrät aber, **wie sich das Licht auf die Wellenlängen verteilt**: das **Spektrum**. Am Teleskop zerlegt ein **Spektrograph** das Licht. In der Brennebene des Teleskops sitzt ein schmaler Spalt, der nur das Licht des untersuchten Objekts durchlässt. Eine Linse (der **Kollimator**) macht das Licht parallel, ein **Gitter** (früher ein Prisma) lenkt die Wellenlängen verschieden stark ab, und eine zweite Linse bildet das Spektrum auf einen Detektor ab.

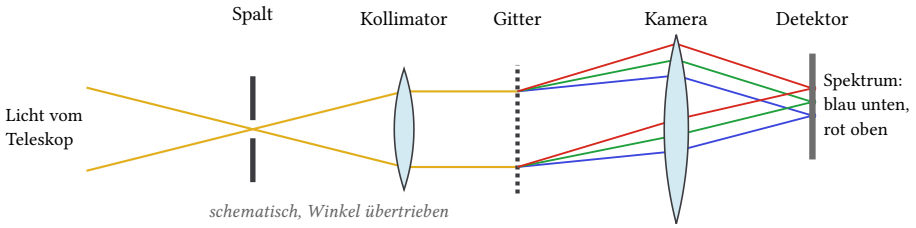


Abbildung 90: Aufbau eines Gitterspektrographen (schematisch). Das Gitter beugt langwelliges Licht stärker als kurzwelliges: Für das Maximum k-ter Ordnung gilt $d \cdot \sin(\alpha_k) = k \cdot \lambda$ mit dem Gitterabstand d.

Wie fein ein Spektrograph Wellenlängen unterscheidet, gibt sein **Auflösungsvermögen** $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ an. Für Sternklassifikation reichen einige hundert bis tausend; wer die winzigen Verschiebungen messen will, die ein Planet an seinem Stern verursacht, braucht R von etwa 100 000 und äußerst stabile Geräte.

4.2 Drei Arten von Spektren

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Ausführlich stehen Spektrallinien und Spektralklassen im Skript AS8. Hier genügen die drei Regeln, die Gustav Kirchhoff 1859 aufstellte:

Merksatz

Kirchhoffsche Regeln

a) Ein heißer, dichter Körper (fester Körper, Flüssigkeit, dichtes Gas) sendet ein **kontinuierliches Spektrum** aus. Beispiel: Glühdraht, das Innere eines Sterns.

b) Ein heißes, dünnes Gas sendet ein **Emissionsspektrum** aus: helle Linien bei Wellenlängen, die für seine Atome und Moleküle kennzeichnend sind. Beispiel: leuchtende Gasnebel wie der Orionnebel.

c) Scheint ein kontinuierliches Spektrum durch ein kühleres, dünnes Gas, fehlen genau diese Wellenlängen: Es entsteht ein **Absorptionsspektrum** mit dunklen Linien. Beispiel: Sterne, deren kühlere Atmosphäre vor dem heißeren Inneren liegt.

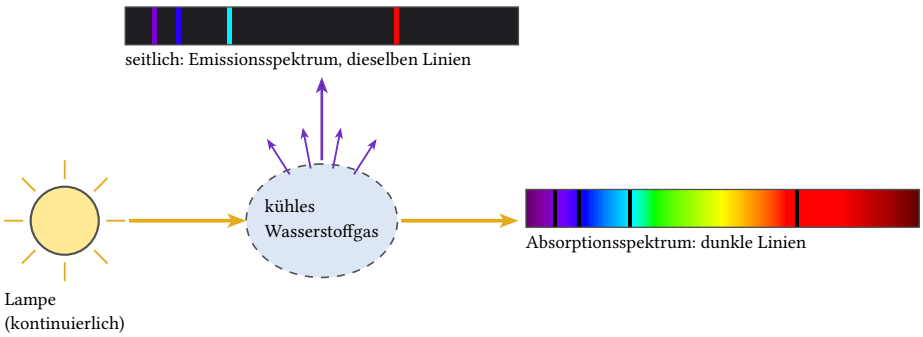


Abbildung 91: Ein kühles Gas vor einer Lampe: Im durchgehenden Licht fehlen die Wasserstofflinien (Absorption); von der Seite gesehen leuchtet das angeregte Gas bei denselben Wellenlängen (Emission).

Die Linien entstehen, weil die Elektronen in Atomen nur bestimmte Energiestufen besetzen können. Ein Übergang zwischen zwei Stufen mit dem Energieunterschied ΔE gehört zu Licht der Frequenz $f = \frac{\Delta E}{h}$. Jedes Element hat dadurch sein eigenes Linienmuster, seinen „Fingerabdruck“.

4.3 Was Spektren verraten

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Aus einem einzigen Spektrum liest ein Astronom eine erstaunliche Menge ab:

Größe	woran man sie erkennt
chemische Zusammensetzung	welche Linien vorkommen und wie stark sie sind
Temperatur	Lage des Strahlungsmaximums (Wien) und welche Linien stark oder schwach sind (Spektralklasse, Skript AS8)
Bewegung auf uns zu oder von uns weg	Verschiebung aller Linien (Doppler-Effekt, nächster Abschnitt)
Rotation	Linien werden breiter, weil sich eine Seite nähert und die andere entfernt
Druck und Dichte	Breite der Linien; Riesensterne mit dünner Atmosphäre haben schmalere Linien als Zwergsterne
Magnetfeld	Aufspaltung der Linien in mehrere (Zeeman-Effekt); so fand George Ellery Hale 1908 Magnetfelder in Sonnenflecken

Tabelle 33: Informationen in einem Spektrum.

Auch das Gas **zwischen** den Sternen verrät sich durch Spektrallinien. Heißes, von Sternen angeregtes Wasserstoffgas leuchtet in der roten H_α-Linie (656 nm); kaltes, neutrales Wasserstoffgas sendet die 21-cm-Linie aus, mit der man die Spiralarme der Milchstraße kartiert hat; in kalten, dichten **Molekülwolken**, in denen Sterne entstehen, findet man im Radio- und Millimeterbereich die Linien von Kohlenstoffmonoxid, Wasser und über 200 weiteren Molekülen. Wie man mit Spektren die Atmosphären von Exoplaneten untersucht, zeigt das Skript AS7.

4.4 Der Doppler-Effekt

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Fährt ein Krankenwagen mit Martinshorn an dir vorbei, hörst du den Ton beim Näherkommen höher und beim Wegfahren tiefer. Christian Doppler erklärte 1842 den Grund: Bewegt sich eine Quelle auf den Beobachter zu, rücken die Wellenberge enger zusammen, bewegt sie sich weg, rücken sie auseinander.

Beim Licht ist es genauso. Entfernt sich eine Lichtquelle, kommen die Wellen mit größerer Wellenlänge an: Alle Spektrallinien sind zum roten Ende des Spektrums verschoben (**Rotverschiebung**). Nähert sie sich, sind sie zum blauen Ende verschoben (**Blauverschiebung**).

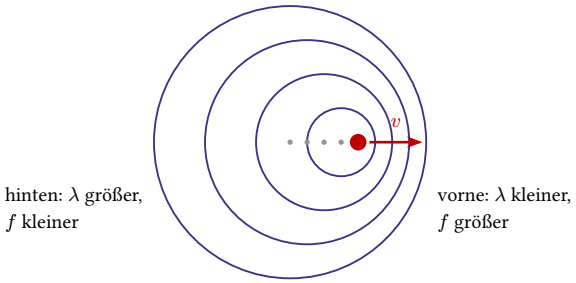


Abbildung 92: Wellenfronten einer Quelle, die sich nach rechts bewegt.

Merksatz

Doppler-Effekt beim Licht (für Geschwindigkeiten klein gegen c): Eine Spektrallinie mit der Laborwellenlänge λ_0 wird bei der Wellenlänge λ beobachtet. Mit $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ gilt

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \quad \Longleftrightarrow \quad v_r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}.$$

- $\Delta\lambda > 0$ (Rotverschiebung): Die Quelle entfernt sich, $v_r > 0$.
- $\Delta\lambda < 0$ (Blauverschiebung): Die Quelle nähert sich, $v_r < 0$.
- Alle Linien eines Objekts verschieben sich um denselben **Bruchteil** ihrer Wellenlänge.

Beispiel 6

Im Spektrum eines Sterns liegt die H_α-Linie bei $\lambda = 656{,}50$ nm, im Labor bei $\lambda_0 = 656{,}28$ nm. Also ist $\Delta\lambda = +0{,}22$ nm und

$$v_r = 3{,}00 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{0{,}22\ \text{nm}}{656{,}28\ \text{nm}} \approx 100 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Der Stern entfernt sich mit $100 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ von uns.

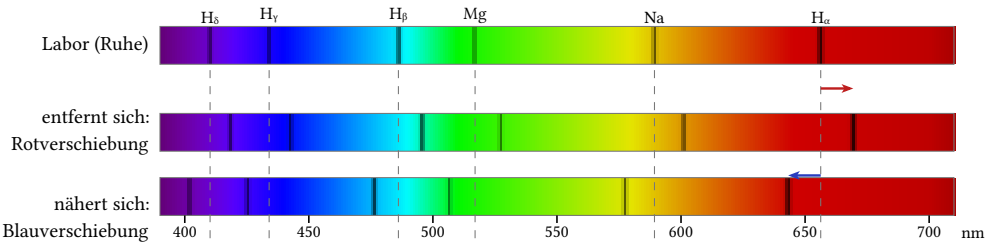


Abbildung 93: Absorptionsspektrum im Labor (oben) und bei einer Quelle, die sich mit $6000\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ entfernt (Mitte) oder nähert (unten); gestrichelt die Laborwellenlängen. So schnell bewegen sich nahe Galaxien, Sterne meist hundertmal langsamer.

Typischer Fehler

Falsch: Rotverschobene Sterne sehen rot aus.

Richtig: Die Verschiebung ist bei Sternen winzig (bei $100\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ ein Drittel Promille). Die Farbe ändert sich dabei nicht merklich; man erkennt die Verschiebung nur an der Lage der Spektrallinien. Die Farbe eines Sterns hängt von seiner Temperatur ab.

4.5 Nur die Radialgeschwindigkeit

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Der Doppler-Effekt misst nur den Teil der Geschwindigkeit, der **längs der Sichtlinie** liegt, die **Radialgeschwindigkeit** v_r. Bewegt sich ein Stern quer zur Sichtlinie, ändert sich sein Abstand zu uns (fast) nicht, und seine Linien bleiben, wo sie sind. Diese **Tangentialgeschwindigkeit** v_t bemerkt man nur daran, dass der Stern über die Jahre am Himmel wandert – falls er nahe genug ist.



Abbildung 94: Zerlegung der Geschwindigkeit v eines Sterns in die Radialgeschwindigkeit $v_r = v \cdot \cos(\varphi)$ längs der Sichtlinie und die Tangentialgeschwindigkeit $v_t = v \cdot \sin(\varphi)$ quer dazu. Nur v_r verschiebt die Spektrallinien.

Auch die Erde bewegt sich: Sie läuft mit knapp $30\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ um die Sonne. Ein Stern in der Nähe der Ekliptik zeigt deshalb im Lauf eines Jahres eine Doppler-Verschiebung, die zwischen etwa $-30\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ und $+30\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ hin und her geht. Astronomen rechnen diesen Anteil heraus – und haben damit nebenbei einen direkten Beweis für den Umlauf der Erde um die Sonne.

Merksatz

Der Doppler-Effekt in der Astronomie

- **Spektroskopische Doppelsterne:** Die Linien schwanken im Takt der Umlaufzeit (Skript AS8).
- **Exoplaneten:** Ein Planet zieht seinen Stern auf eine kleine Bahn um den gemeinsamen Schwerpunkt. Jupiter bewegt die Sonne mit rund $12{,}5\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$; die erste Entdeckung eines Planeten bei einem sonnenähnlichen Stern gelang 1995 so (Skript AS7).
- **Rotation:** Bei der Sonne, bei Planeten und bei ganzen Galaxien ist eine Seite blau-, die andere rotverschoben. Aus Rotationskurven von Galaxien folgt die Dunkle Materie (Skript AS10).
- **Expansion des Universums:** Fast alle Galaxien zeigen Rotverschiebungen, die mit der Entfernung wachsen (Hubble-Relation, Skript AS10). Streng genommen ist diese kosmologische Rotverschiebung eine Dehnung der Wellen durch die Ausdehnung des Raums; für nahe Galaxien rechnet man aber wie beim Doppler-Effekt.

Fachbegriffe: Spektrum · Spektrograph · Kollimator · Gitter · Auflösungsvermögen eines Spektrographen · kontinuierliches Spektrum · Emissionsspektrum · Absorptionsspektrum · Kirchhoffsche Regeln · Molekülwolke · Doppler-Effekt · Rotverschiebung · Blauverschiebung · Radialgeschwindigkeit · Tangentialgeschwindigkeit

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Radialgeschwindigkeit aus dem Spektrum** ↗ · **Linienspektren und Energieniveaus** ↗ · **Doppler-Effekt** ↗

5 Andere Boten: Teilchen und Gravitationswellen

5.1 Kosmische Strahlung

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Um 1900 wunderten sich Physiker, warum sich ein elektrisch geladenes Elektroskop auch in einem gut isolierten Gefäß langsam entlädt. Man vermutete Strahlung aus radioaktiven Gesteinen im Boden; dann müsste sie mit der Höhe abnehmen. Der österreichische Physiker Victor Hess stieg 1912 mit einem Ballon bis auf über 5000 m – und fand, dass die Strahlung oben **stärker** wird. Sie kommt also aus dem All. Für die Entdeckung dieser **kosmischen Strahlung** erhielt Hess 1936 den Nobelpreis.

Die kosmische Strahlung besteht überwiegend aus sehr schnellen Atomkernen: rund 90 % Protonen, knapp 10 % Heliumkerne, dazu schwerere Kerne und Elektronen. Ein Teil stammt von der Sonne, die energiereichsten Teilchen kommen aus der Milchstraße und von außerhalb. Die größte je gemessene Energie eines einzelnen Teilchens liegt bei etwa $3 \cdot 10^{20}$ eV – so viel wie ein kräftig geschlagener Tennisball, vereint in einem einzigen Atomkern.

Trifft ein solches Teilchen auf die Atmosphäre, stößt es mit einem Atomkern der Luft zusammen und erzeugt viele neue Teilchen, die ihrerseits weitere erzeugen: einen **Luftschauer**. Am Boden kommen vor allem **Myonen** an, schwere Verwandte des Elektrons, etwa eines pro Quadratzentimeter und Minute. Das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien weist große Luftschauer mit 1600 Wassertanks auf 3000 km² nach.

Merksatz

Kosmische Strahlung als Bote: Die geladenen Teilchen werden von den Magnetfeldern der Milchstraße und des Sonnensystems auf Schraubenbahnen gezwungen. Wenn sie ankommen, zeigt ihre Flugrichtung deshalb fast nie zur Quelle zurück. Sie verraten viel über die Vorgänge, die Teilchen beschleunigen (Supernova-Überreste, aktive Galaxienkerne), aber kaum, wo genau diese stattfinden.

5.2 Neutrinos

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen mit winziger Masse, die fast mit Lichtgeschwindigkeit fliegen und mit Materie nur äußerst selten reagieren. Bei der Kernfusion im Inneren der Sonne entstehen sie in riesiger Zahl: Durch jeden Quadratzentimeter der Erde fliegen pro Sekunde rund 65 Milliarden Sonnenneutrinos – auch durch deinen Daumennagel, bei Tag und bei Nacht, denn die Erde ist für sie fast durchsichtig.

Genau das macht sie zu besonderen Boten: Licht aus dem Sonnenkern braucht wegen der ständigen Wechselwirkung mit dem Gas über hunderttausend Jahre bis zur Oberfläche, Neutrinos verlassen die Sonne in gut zwei Sekunden und bringen Nachricht direkt aus dem Kern. Weil sie so selten reagieren, braucht man riesige Detektoren tief unter der Erde, wo die kosmische Strahlung nicht hinkommt: Super-Kamiokande in Japan ist ein Tank mit 50 000 Tonnen reinstem Wasser, IceCube am Südpol nutzt einen Kubikkilometer Eis. Reagiert ein Neutrino, entsteht ein schnelles geladenes Teilchen, das einen schwachen bläulichen Lichtblitz auslöst; Tausende Lichtsensoren fangen ihn auf.

Beispiel 7

Supernova 1987A. Am 23. Februar 1987 leuchtete in der Großen Magellanschen Wolke, einer Nachbargalaxie in etwa 168 000 Lj Entfernung, eine Supernova auf, die hellste seit fast 400 Jahren. Einige Stunden **bevor** man das Licht sah, registrierten drei Neutrinodetektoren in Japan, den USA und der Sowjetunion innerhalb von 13 Sekunden zusammen rund zwei Dutzend Neutrinos. Das bestätigte die Vorstellung vom Kernkollaps (Skript AS9): Fast die gesamte Energie wird als Neutrinos frei, die sofort entweichen, während das Licht erst entsteht, wenn die Stoßwelle Stunden später die Oberfläche des Sterns erreicht.

5.3 Gravitationswellen

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie krümmen Massen Raum und Zeit, die **Raumzeit**. Werden große Massen schnell und ungleichmäßig beschleunigt – etwa zwei Schwarze Löcher, die einander umkreisen –, breiten sich Störungen

dieser Krümmung als **Gravitationswellen** mit Lichtgeschwindigkeit aus. Läuft eine solche Welle durch einen Ring frei schwebender Körper, dehnt sie die Abstände abwechselnd in einer Richtung und staucht sie senkrecht dazu.

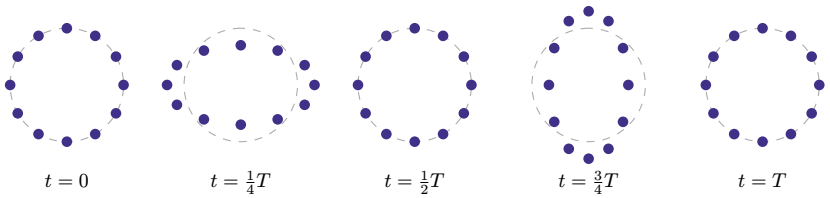


Abbildung 95: Wirkung einer Gravitationswelle, die senkrecht zur Zeichenebene durch einen Ring frei schwebender Testmassen läuft, während einer Schwingungsdauer T. Gestrichelt der ungestörte Ring. Die Verformung ist um etwa 20 Zehnerpotenzen übertrieben.

Die relative Längenänderung $h = \frac{\Delta L}{L}$ heißt **Dehnung**. Selbst bei den stärksten Ereignissen beträgt sie auf der Erde nur etwa 10^{-21}. Gemessen wird sie mit **Laser-Interferometern**: Ein Laserstrahl wird geteilt, läuft durch zwei senkrecht zueinander stehende, kilometerlange Arme, wird an Spiegeln zurückgeworfen und wieder überlagert. Ändert eine Gravitationswelle die Armlängen unterschiedlich, verschiebt sich das Interferenzmuster am Detektor.

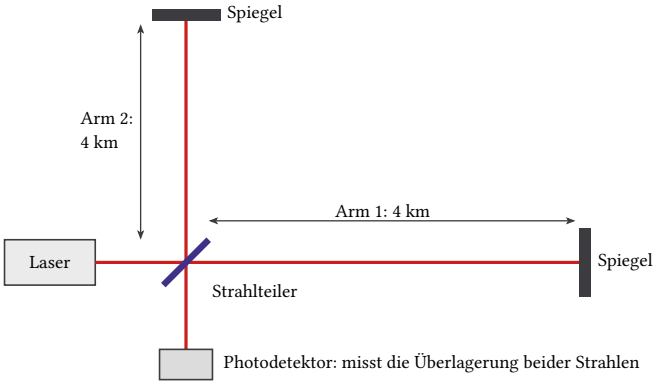


Abbildung 96: Prinzip eines Gravitationswellen-Detektors wie LIGO (Michelson-Interferometer, nicht maßstäblich). Im Ruhezustand löschen sich die beiden Strahlen am Detektor aus; eine Längenänderung der Arme lässt Licht durch.

Beispiel 8

GW150914. Am 14. September 2015 registrierten die beiden LIGO-Detektoren in Livingston (Louisiana) und Hanford (Washington), 3000 km voneinander entfernt, im Abstand von 7 Millisekunden dasselbe Signal: In 0,2 Sekunden stieg die Frequenz von 35 Hz auf 250 Hz, die Dehnung erreichte $1{,}0 \cdot 10^{-21}$. Der Vergleich mit Rechnungen ergab zwei Schwarze Löcher mit etwa 36 und 29 Sonnenmassen in rund 1,3 Milliarden Lj Entfernung, die zu einem Schwarzen Loch von etwa 62 Sonnenmassen verschmolzen. Rund drei Sonnenmassen wurden in Bruchteilen einer Sekunde als Energie der Gravitationswellen abgestrahlt. Rainer Weiss, Barry Barish und Kip Thorne erhielten dafür 2017 den Nobelpreis.

Bei einer Armlänge von $L = 4$ km bedeutet $h = 1{,}0 \cdot 10^{-21}$ eine Längenänderung von $\Delta L = h \cdot L = 4 \cdot 10^{-18}$ m – ein Vierhundertstel des Durchmessers eines Protons.

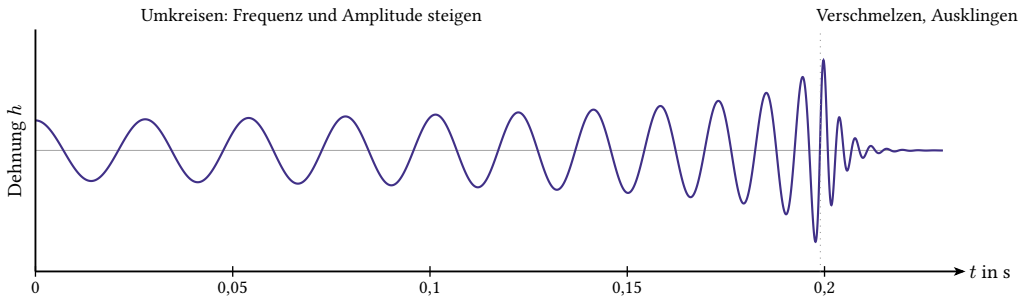


Abbildung 97: Signalform einer Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher (Modell nach dem Vorbild von GW150914, schematisch): Beim Umkreisen wachsen Frequenz und Amplitude („Chirp“), nach der Verschmelzung klingt das neue Schwarze Loch schnell aus.

Seitdem haben LIGO, das europäische Virgo bei Pisa und das japanische KAGRA weit über hundert Verschmelzungen beobachtet. Im Weltraum soll in den 2030er-Jahren LISA folgen, mit Armen von 2,5 Millionen Kilometern Länge, empfindlich für langsamere Wellen.

	elektromagnetische Wellen	Gravitationswellen
was schwingt	elektrisches und magnetisches Feld	die Raumzeit selbst: Abstände werden gedehnt und gestaucht
Quelle	beschleunigte elektrische Ladungen	ungleichmäßig beschleunigte große Massen
Wellenart	transversal	transversal
Geschwindigkeit	c, auch im Vakuum	c, auch im Vakuum
Wechselwirkung mit Materie	werden verschluckt, gestreut, gebrochen	durchdringen Materie fast ungehindert
bisher gemessene Frequenzen	etwa 10^7 Hz bis über 10^{27} Hz	etwa 10 Hz bis einige 1000 Hz (vom Boden aus)

Tabelle 34: Elektromagnetische Wellen und Gravitationswellen im Vergleich.

Typischer Fehler

Falsch: Gravitationswellen kann man hören, sie sind eine Art Schall aus dem All.

Richtig: Gravitationswellen sind Schwingungen der Raumzeit und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit auch durch das Vakuum aus. Weil die Frequenzen von LIGO-Signalen im Hörbereich liegen, macht man sie gern als Ton hörbar – das ist eine Darstellung, kein Schall.

5.4 Mehrere Boten zugleich

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Am meisten lernt man, wenn ein Ereignis mehrere Boten zugleich schickt (**Multi-Messenger-Astronomie**). Bei der Supernova 1987A waren es Neutrinos und Licht. Am 17. August 2017 fingen LIGO und Virgo die Gravitationswellen zweier verschmelzender **Neutronensterne** in etwa 130 Millionen Lj Entfernung auf; 1,7 Sekunden später registrierte ein Satellit einen kurzen Gammastrahlenausbruch aus derselben Himmelsgegend, und in den folgenden Nächten fanden Teleskope ein neues, schnell verblassendes Licht in einer Galaxie. Aus diesem einen Ereignis folgte:

- Gravitationswellen laufen mit Lichtgeschwindigkeit: Nach 130 Millionen Jahren Reise kamen sie nur Sekunden vor dem Gammalicht an.
- Bei solchen Verschmelzungen entstehen große Mengen schwerer Elemente wie Gold und Platin (Skript AS9).

Fachbegriffe: kosmische Strahlung · Luftschauer · Myon · Neutrino · Neutrinodetektor · Supernova 1987A · Raumzeit · Gravitationswelle · Dehnung · Laser-Interferometer · Neutronenstern · Multi-Messenger-Astronomie

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Myonen aus der Höhenstrahlung** ↗ · **Michelson-Interferometer** ↗



6 Signallaufzeit und Blick in die Vergangenheit

6.1 Licht braucht Zeit

Wahlfach Astronomie

Bis ins 17. Jahrhundert glaubten die meisten Gelehrten, Licht breite sich unendlich schnell aus. Der dänische Astronom Ole Rømer bemerkte 1676 an den Verfinsterungen des Jupitermondes Io, dass sie sich verspäten, wenn die Erde weit vom Jupiter entfernt ist, und verfrühen, wenn sie ihm nahe ist. Er schloss daraus, dass das Licht Zeit braucht, um die zusätzliche Strecke quer durch die Erdbahn zurückzulegen. Heute weiß man: Für den Durchmesser der Erdbahn (2 AE) braucht das Licht knapp 17 Minuten.

Merksatz

Signallaufzeit: Ein Signal, das sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, braucht für die Strecke r die Zeit

$$t = \frac{r}{c}.$$

Ein **Lichtjahr** ist die Strecke, die Licht in einem Jahr zurücklegt: $1\ \text{Lj} \approx 9{,}46 \cdot 10^{15}\ \text{m}$ (Skript AS8). Entsprechend ist eine Lichtminute die Strecke, die Licht in einer Minute zurücklegt: $1{,}8 \cdot 10^{10}\ \text{m}$.

Objekt	Entfernung	Signallaufzeit
Mond	384 400 km	1,3 s
Sonne	1 AE	8,3 min
Mars	0,37 AE bis 2,7 AE	3 min bis 22 min
Jupiter	4,0 AE bis 6,4 AE	33 min bis 53 min
Raumsonde Voyager 1 (2026)	rund 170 AE	fast 1 Tag
Proxima Centauri, nächster Stern	4,24 Lj	4,24 Jahre
Sirius	8,6 Lj	8,6 Jahre
Polarstern	etwa 430 Lj	etwa 430 Jahre
Orionnebel	etwa 1350 Lj	etwa 1350 Jahre
Zentrum der Milchstraße	etwa 26 000 Lj	etwa 26 000 Jahre
Andromedagalaxie	2,5 Millionen Lj	2,5 Millionen Jahre
Virgo-Galaxienhaufen	etwa 55 Millionen Lj	etwa 55 Millionen Jahre
kosmische Hintergrundstrahlung	–	fast 13,8 Milliarden Jahre

Tabelle 35: Signallaufzeiten des Lichts (gerundet). Bei sehr fernen Objekten lässt sich wegen der Ausdehnung des Universums keine einfache Entfernung angeben; dort nennt man die Laufzeit.

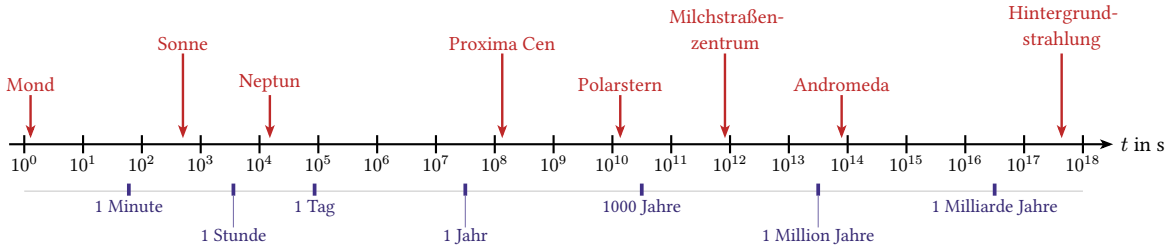


Abbildung 98: Signallaufzeiten des Lichts auf einer logarithmischen Zeitachse (rote Pfeile), darunter vertraute Zeitspannen zum Vergleich (Striche in der Skriptfarbe).

Für die Raumfahrt hat das handfeste Folgen. Ein Funkbefehl an einen Mars-Rover ist bis zu 22 Minuten unterwegs, und genauso lange dauert es, bis das Bild zurückkommt, auf dem man sieht, was er getan hat. Rover fahren deshalb weitgehend selbstständig und erkennen Hindernisse selbst.

6.2 Blick in die Vergangenheit

Wahlfach Astronomie

Weil das Licht Zeit braucht, sehen wir jedes Himmelsobjekt so, wie es war, als das Licht losging: die Sonne so, wie sie vor gut acht Minuten aussah, den Polarstern so, wie er im späten 16. Jahrhundert war, und die Andromedagalaxie im Zustand vor 2,5 Millionen Jahren, als auf der Erde gerade die ersten Vertreter der Gattung Mensch lebten.

Merksatz

Jeder Blick ins All ist ein Blick in die Vergangenheit. Je weiter ein Objekt entfernt ist, desto älter ist das Licht, das wir von ihm empfangen. Die Zeit, die das Licht unterwegs war, heißt **Rückblickzeit**. Der Sternenhimmel ist deshalb keine Momentaufnahme: Jeder Stern zeigt sich uns zu einem anderen Zeitpunkt seiner Geschichte.

Daraus folgen erstaunliche Dinge. Ein Stern, der heute explodiert, erscheint erst dann als Supernova am Himmel, wenn sein Licht bei uns ankommt – bei einem Stern in 600 Lj Entfernung also erst in 600 Jahren. Umgekehrt kann ein Stern, den wir sehen, längst erloschen sein. Für die Erforschung des Universums ist die Rückblickzeit aber ein Geschenk: Weil man in die Ferne zugleich in die Vergangenheit blickt, kann man die Geschichte des Kosmos direkt beobachten. Ferne, also junge Galaxien sehen anders aus als die heutigen: kleiner, unregelmäßiger und mit viel mehr Sternentstehung (Skript AS10).

Typischer Fehler

Falsch: Am Nachthimmel sehen wir die Sterne so, wie sie jetzt gerade sind.

Richtig: Wir sehen jeden Stern so, wie er war, als sein Licht ihn verließ – Sirius vor knapp 9 Jahren, den Polarstern vor über 400 Jahren. Ob es einen Stern heute noch gibt, wissen wir erst, wenn das heute ausgesandte Licht ankommt.

Bei den meisten Sternen ändert sich in einigen hundert Jahren allerdings fast nichts; die Bilder sind alt, aber meist noch zutreffend.

⋆ Das älteste Licht, das man mit bloßem Auge sieht

Die Andromedagalaxie steht im Herbst abends hoch im Osten bis Süden, zwischen den Sternbildern Kassiopeia und Pegasus. Unter dunklem Himmel, fern von Stadtlicht, erscheint sie mit bloßem Auge als schwacher, länglicher Nebelfleck, im Fernglas deutlicher. Ihr Licht war 2,5 Millionen Jahre unterwegs – sie ist das fernste Objekt, das man ohne Hilfsmittel sehen kann. Hilfsmittel: Sternkarte oder App zum Finden, ein Fernglas; das Auge braucht etwa 20 Minuten Dunkelheit.

6.3 Rückblickzeit und Entfernung

Wahlfach Astronomie

Mit großen Teleskopen blickt man Milliarden Jahre zurück. Das James-Webb-Teleskop hat Galaxien gefunden, deren Licht über 13 Milliarden Jahre unterwegs war; es zeigt diese Galaxien, wie sie wenige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall aussahen. Noch weiter zurück reicht die **kosmische Hintergrundstrahlung**: Sie wurde etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall frei, als das Universum durchsichtig wurde, und ist das älteste Licht überhaupt. Dahinter kann kein Teleskop schauen.

Bei so großen Entfernungen muss man vorsichtig sein. Während das Licht unterwegs war, hat sich das Universum ausgedehnt. Eine Galaxie, deren Licht 13 Milliarden Jahre unterwegs war, ist heute nicht 13 Milliarden Lichtjahre entfernt, sondern viel weiter, und war beim Aussenden viel näher. Für ferne Objekte gibt man deshalb meist die Rückblickzeit oder die Rotverschiebung an statt einer Entfernung (Skript AS10).

Ein Blick in die Zukunft?

Kann man auch in die Zukunft sehen? Nein: Jedes Signal, das uns erreicht, wurde vor seiner Ankunft ausgesandt. Und weil sich nichts schneller als das Licht ausbreitet, kann uns auch keine Nachricht von einem fernen Ereignis früher erreichen, als das Licht dafür braucht. Die Lichtgeschwindigkeit ist eine Grenze für jede Art von Informationsübertragung – auch für Gravitationswellen, die genauso schnell sind.

Fachbegriffe: Signallaufzeit · Lichtjahr · Lichtminute · Rückblickzeit · kosmische Hintergrundstrahlung

Üben: **noctua ↗** Ausprobieren: **Lichtgeschwindigkeit: Laserabstandsmesser im Wasser ↗** · **Logarithmisch darstellen ↗**