



Grundlagen der Astrophysik

**Handreichung für den Unterricht
der gymnasialen Oberstufe**

München 2009

Erarbeitet im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Unterricht und Kultus

Herausgeber:

Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung

Anschrift:

Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung

Abteilung Gymnasium

Schellingstr. 155

80797 München

Tel.: 089 2170-2160

Fax: 089 2170-2125

Internet: www.isb.bayern.de

E-Mail: andreas.thalmaier@isb.bayern.de

Bilder Umschlagseite:

Schülergruppe Max-Planck-Gymnasium, München (Josef Lambert)

Krebsnebel, NASA, ESA und Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University)

Inhalt

Vorwort	4
Fortsetzung einer Erfolgsgeschichte	4
Aufbau und Verwendung	4
Wahl des Fachs Astrophysik	5
1 Didaktische und methodische Hinweise zu den einzelnen Abschnitten des Lehrplans	7
Vorbemerkungen	8
1.1 Orientierung am Himmel	8
1.2 Überblick über das Sonnensystem	18
1.3 Die Sonne	37
1.4 Sterne	52
1.5 Großstrukturen im Weltall	96
2 Beobachtung und Geräteausstattung	115
2.1 Organisation von Beobachtungsabenden	116
2.2 Beobachtungsobjekte	119
2.3 Beobachtungsgeräte	121
2.4 Sonnenbeobachtung	125
2.5 Astronomie-Fachhandel	127
2.6 Astronomische Vereine, Sternwarten und Planetarien	127
3 Ergänzungen	129
3.1 Anmerkungen zum Lehrplanabschnitt 10.1 (Astronomische Weltbilder)	130
3.2 Zeittafel zur Astronomie	132
Literatur und Medien	135

Vorwort

Fortsetzung einer Erfolgsgeschichte

Die Astronomie gilt als eine der ältesten Wissenschaften, und bis heute übt sie eine ganz besondere Faszination auf die Menschen aus. Seit jeher fragen die Menschen nach dem „Wesen der Sterne“, und beim Blick in den nächtlichen Himmel wird der Mensch wie von selbst an die Grundfragen seiner Existenz geführt.

Seit ihrer Trennung von der Astrologie hat sich die Astronomie von der reinen Beobachtung der Sterne hin zu einer naturwissenschaftlichen Disziplin unter Verwendung physikalischer Prinzipien und Messmethoden entwickelt, sodass die moderne wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Sternen durch den Begriff „Astrophysik“ treffend beschrieben wird. Aus diesem Grund trägt die Lehrplanalternative im achtjährigen Gymnasium diesen Namen.

Am bayerischen Gymnasium besteht seit nun fast dreißig Jahren die gute Tradition, das natürliche Interesse an astrophysikalischen Fragestellungen im Rahmen des Kurses Astronomie zu wecken, zu fördern und weiterzuführen. An vielen Schulen sind derartige Kurse zur festen Institution geworden, und der Kreis der Lehrkräfte sowie der Schülerinnen und Schüler, die sich für die Astrophysik begeistern, wächst ständig.

Um diesen Trend auch im achtjährigen Gymnasium fortzuführen und den Einstieg in die Astrophysik für Lehrende und Lernende zu erleichtern, wurde auf Basis der ISB-Handreichung „Grundkurs Astronomie“ die vorliegende Handreichung vollständig neu erarbeitet. Sie soll für alle interessierten Lehrkräfte eine verlässliche Begleiterin bei der Vermittlung der Astrophysik als einer modernen, spannenden und lebendigen Wissenschaft werden.

Aufbau und Verwendung

Die vorliegende Handreichung ist deutlich am Lehrplan orientiert und soll durch Vorschläge und Hinweise Möglichkeiten zu dessen Umsetzung aufzeigen. Sie ist in diesem Sinne ein Grundlagenbuch, aber weder als Unterrichtsskript zu verstehen, das es in allen Details umzusetzen gilt, noch als Schul- oder Lehrbuch. Ergänzende Literatur findet sich im Literatur- und Medienverzeichnis.

Bei den Erläuterungen zu den einzelnen Abschnitten des Lehrplans in Kapitel 1 werden didaktische und methodische Hinweise gegeben, einzelne Versuche beschrieben und theoretische Ansätze dargelegt, die der Lehrkraft weitere Informationen liefern. Dabei stellt der Pfeil → weitere Bezüge her oder verweist auf konkrete Lehrplankapitel. Grau unterlegte Textstellen enthalten **Ergänzungen** und Hintergrundinformationen, die vorwiegend für Lehrkräfte gedacht sind. Soweit es angebracht ist, wird an entsprechenden Stellen auf Quellen und weiterführende Literatur verwiesen.

Kapitel 2 enthält Hinweise zu Organisation und Durchführung von Beobachtungsabenden, eine ausführliche Liste mit Beobachtungsobjekten sowie grundlegende Informationen zu Beobachtungsgeräten und zur Sonnenbeobachtung. Ferner ist eine Auswahl gängiger Firmen aufgeführt, die Geräte zum Astronomieunterricht anbieten. Die Auswahl berücksichtigt regionale Gegebenheiten und beruht auf Erfahrungen von Kolleginnen und Kollegen; sie erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Mit Hilfe der angegebenen Übersicht zu Internetadressen, astronomischen Vereinen, Sternwarten und Planetarien lassen sich außerschulische Kontakte zu astronomischen Einrichtungen knüpfen. Diese Einrichtungen helfen in der Regel auch, bei fehlender Schulausstattung Beobachtungsabende durchzuführen.

In Kapitel 3 werden zunächst Anmerkungen zu den Lehrplaninhalten „Astronomische Weltbilder“ sowie „Bewegungen unter Einwirkung der Gravitationskraft; Gravitationsgesetz, Planetenbewegung“ der 10. Jahrgangsstufe gegeben. Ferner ist ein Überblick zur Geschichte der Astronomie aufgeführt.

Das Verzeichnis zu Literatur und Medien orientiert sich an der Verwendbarkeit im Unterricht bzw. für die Unterrichtsvorbereitung.

Der Handreichung liegt eine CD bei, deren Ordnerstruktur nebenstehend abgebildet ist. Sie enthält neben einer Sammlung ausgewählter Aufgaben und Klausuren auch Abituraufgaben zur Astrophysik sowie in geringem Umfang Software und Zusatzmaterial. Im Text wird durch das Symbol **CD** jeweils darauf hingewiesen.



Die Handreichung enthält einige Bilder der NASA / ESA. Diese Bilder sind gemäß den Lizenzbedingungen der NASA / ESA (siehe <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>) für Unterrichtszwecke freigegeben und gehören zur Public Domain.

Alle weiteren Bilder und graphischen Darstellungen stammen, wenn nicht anders gekennzeichnet, von Josef Lambert.

Mit Einverständnis der Autoren der ISB-Handreichung „Grundkurs Astronomie“ (ISB München, 1988) Rainer Gaitzsch, Franz Mraz, Prof. Dr. Michael Toepell und Roland Reger wurden die aus der bisherigen Handreichung übernommenen Textstellen nicht eigens als Zitate gekennzeichnet.

Besonderer Dank gilt Herrn StD Friedrich W. Volck (Gymnasium Alzenau) für seine hilfreichen Hinweise und Ergänzungen.

Wahl des Fachs Astrophysik

Astrophysik kann in der Jahrgangsstufe 12 des achtjährigen bzw. in der Jahrgangsstufe 13 des neunjährigen Gymnasiums (als Grundkurs Astronomie) alternativ zum regulären Physikunterricht gewählt werden. Die Wahl dieser Alternative schließt die Möglichkeit zum schriftlichen beziehungsweise mündlichen Abitur ein.

Die Schülerinnen und Schüler sollten frühzeitig über die Lehrplanalternative Astrophysik in der Jahrgangsstufe 12 informiert werden. Da im Physikunterricht der Jahrgangsstufe 10 die Lehrplanabschnitte 10.1 „Astronomische Weltbilder“ und 10.2, Unterpunkt „Bewegungen unter Einwirkung der Gravitationskraft; Gravitationsgesetz, Planetenbewegung“, zu behandeln sind, bieten sich hier die besten Möglichkeiten, Ausblicke auf das Fach Astrophysik zu geben und Interesse für diese faszinierende Disziplin zu wecken.

Neben der allgemeinen Information aller Schülerinnen und Schüler sollen insbesondere jene vor der Kurswahl individuell beraten werden, die in der Jahrgangsstufe 11 des achtjährigen Gymnasiums bzw. in der Jahrgangsstufe 12 des neunjährigen Gymnasiums Physik belegen. Ein bebildeter Aushang „Wie komme ich zum Fach Astrophysik?“ in einem Schaukasten der Schule kann hierzu die Grundinformationen enthalten. Motivierend wirkt sich auch ein Artikel über den Astrophysikkurs im Jahresbericht der Schule aus.

München, im Dezember 2008

StD Josef Lambert (Max-Planck-Gymnasium, München)
OStR Andreas Thalmaier (ISB)

1 Didaktische und methodische Hinweise



Stern V838Mon / Quelle: NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI / AURA)

Vorbemerkungen

Die Inhalte dieses ersten Kapitels sind deutlich am Lehrplan für Astrophysik orientiert. Die im Lehrplan für die jeweiligen Abschnitte angegebenen Stundenrichtwerte geben eine Orientierung dafür, wie ausführlich die jeweiligen Inhalte behandelt werden sollen. Darauf aufbauend wird jede Lehrkraft ihre persönlichen Schwerpunkte setzen.

Reines Faktenwissen lässt sich, in sinnvolle „Portionen“ aufgeteilt, unter Verwendung des Lehrbuchs oder geeigneter Textkopien häufig von den Schülerinnen und Schülern selbst erarbeiten. Bei der Auswahl von Übungsaufgaben haben der Beispielcharakter und die Unterstützung der Anschaulichkeit hohe Priorität. Für ihre Bearbeitung sollten die Lehrkräfte bevorzugt auf jene Formen zurückgreifen, die gezielt die Selbständigkeit der Lernenden fördern.

Gespräche mit Physik-Lehrkräften haben ergeben, dass ihnen ein aktuell gestalteter Unterricht in Astrophysik ein ganz besonderes Anliegen ist. Hierzu bieten sich in erster Linie Beiträge aus Fachzeitschriften und ausgewählte Internetseiten an, aber auch Artikel aus Tages- oder Wochenzeitungen. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang

- die Fachzeitschrift „Sterne und Weltraum“, die ergänzend zu einzelnen Artikeln unter www.wissenschaft-schulen.de auch ausgearbeitete Unterrichtsmaterialien zum Download bereitstellt.
- die NASA-Seite <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/> auf der jeden Tag ein anderes Bild mit Bezug zur Astronomie einschließlich Begleittext zu finden ist. Im Verlauf einer Woche lässt sich fast immer einer der Beiträge als Stundeneinstieg oder Ergänzung zum Unterricht zu verwenden. Es hat sich auch bewährt, Bildrecherchen zu angekündigten Themen als Hausaufgabe zu stellen.
- die Seite <http://www.astronews.com/> auf der neben allgemeinen Informationen und Links unter der Rubrik „News“ aktuelle Nachrichten zu finden sind. Ähnliches gilt für die Seite <http://de.wikipedia.org/wiki/Portal:Astronomie>.

Gerade diese aktuellen Nachrichten zeigen sehr schön, wie lebendig und spannend die Astrophysik ist. Die Lehrkräfte sollten an geeigneten Stellen aber auch bewusst machen, dass es viele Fragen gibt, die man derzeit nicht oder nur ungenau beantworten kann, und welche Bedeutung hier dem Zusammenspiel von Beobachtung und Modellbildung zukommt.

1.1 Orientierung am Himmel

Überblick über typische astronomische Objekte

Die Schülerinnen und Schüler haben vor allem im Rahmen der 10. Jahrgangsstufe, aber auch schon vorher, verschiedene astronomische Objekte kennengelernt. Dies lässt sich aufgreifen und für einen interessanten Einstieg nutzen, der zugleich eine Übersicht über die typischen Objekte der Astrophysik liefert.

Folgende Möglichkeiten bieten sich an: In Verbindung mit einem Arbeitsauftrag wird

- ausgewähltes Bildmaterial gezeigt;
- ein historischer Abriss gegeben, der vor allem astrophysikalische Aspekte und die Entdeckung jeweils neuer Objekte betont;

- die Astronomieabteilung des Deutschen Museums München oder einer entsprechenden Einrichtung besucht.

Die folgende Tabelle kann den Schülerinnen und Schülern zusätzlich Größenvergleiche und vor allem eine erste Vorstellung von den Ausmaßen des Universums und der Verteilung der Materie darin bieten.

Größenordnungen im Universum (einige charakteristische Beispiele)

Längen	Proton, Atomkerne	10^{-15}	m
	Atome, Moleküle	10^{-10}	m
	Wellenlänge von Licht	10^{-7}	m
	Ameise	10^{-3}	m
	Mensch	10^0	m
	Sonnenradius	10^9	m
	Entfernung Sonne – nächster Fixsterne	10^{16}	m
	Entfernung zum Zentrum unserer Milchstraße	10^{20}	m
	Zeiten	Planck-Zeit	10^{-43}
Schwingungsdauer Kammerton a		10^{-3}	s
Zeit zwischen zwei Herzschlägen (Ruhepuls)		10^0	s
Lichtlaufzeit Sonne – Erde		10^3	s
Umlaufdauer Erde – Sonne		10^7	s
Lebensdauer Mensch		10^9	s
Umlaufzeit Sonne – Milchstraßenzentrum		10^{16}	s
Alter des Universums		10^{17}	s
Massen	Elektron	10^{-31}	kg
	Proton	10^{-27}	kg
	Briefmarke	10^{-5}	kg
	1 Liter Wasser	10^0	kg
	Mensch	10^2	kg
	Lokomotive	10^5	kg
	Erde	10^{25}	kg
	Sonne	10^{30}	kg
	Milchstraße	10^{41}	kg

Bereits in diesem Zusammenhang wird man die Astronomische Einheit und das Lichtjahr als für astronomische Belange zweckmäßige Längeneinheiten einführen. Eine sehr schöne Veranschaulichung bietet die Umrechnung $1 \text{ AE} \approx 8,3 \text{ Lmin}$.

Ergänzungen

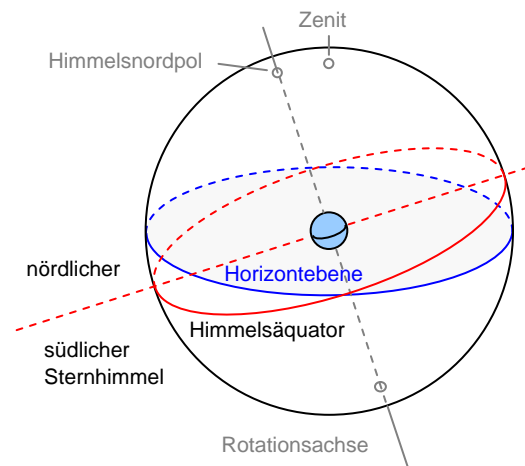
- Das beobachtbare Universum enthält etwa 10^{80} Atome.
- Eine anschauliche Darstellung von Größenverhältnissen finden man auf der Seite <http://microcosm.web.cern.ch/Microcosm/P10/german/welcome.html>.

Tägliche und jährliche Bewegung von Himmelskörpern

Als Einstieg in diese Thematik eignet sich die Aufforderung an die Schülerinnen und Schüler, Beobachtungen zu nennen, die nahe legen, dass sich die Erde um die Sonne bewegt und nicht umgekehrt. Die vorgetragenen Aspekte werden man im weiteren Unterrichtsverlauf an geeigneter Stelle aufgreifen.

Als wichtiges gedankliches Hilfsmittel führt man zunächst die *Himmelskugel* (Sphäre) mit den *Himmelspolen* und dem *Himmelsäquator* ein. Ihr Radius ist im Vergleich zum Abstand Erde – Sonne so eminent groß, dass es unerheblich ist, ob ihr Mittelpunkt mit dem Erdmittelpunkt oder dem Sonnenmittelpunkt zusammenfällt. Der Beobachter sieht alle Sterne auf diese Himmelskugel projiziert, auch wenn sie unterschiedlich weit von der Erde entfernt sind.

Für eine Orientierung am Sternhimmel ist die Kenntnis elementarer Sternbilder und ihrer Hauptsterne eine wichtige Voraussetzung (→ Orientierungshilfen S. 117, 118). In diesem Zusammenhang ist der Gebrauch einer *drehbaren Sternkarte* unerlässlich (→ S. 136, [M1] bis [M4]). Die Grundlagen im Umgang mit der Sternkarte müssen erläutert und geübt werden. Das lässt sich vor allem in Verbindung mit Beobachtungsabenden gut umsetzen, da der unmittelbare Vergleich mit der Realität das Lernen erleichtert. Mithilfe der drehbaren Sternkarte lässt sich auch eine Reihe von Aufgaben sehr anschaulich lösen. Computer-Planetarien sind kein Ersatz für eine drehbare Sternkarte, jedoch eine hilfreiche Ergänzung (→ S. 137, [M6] bis [M9]).

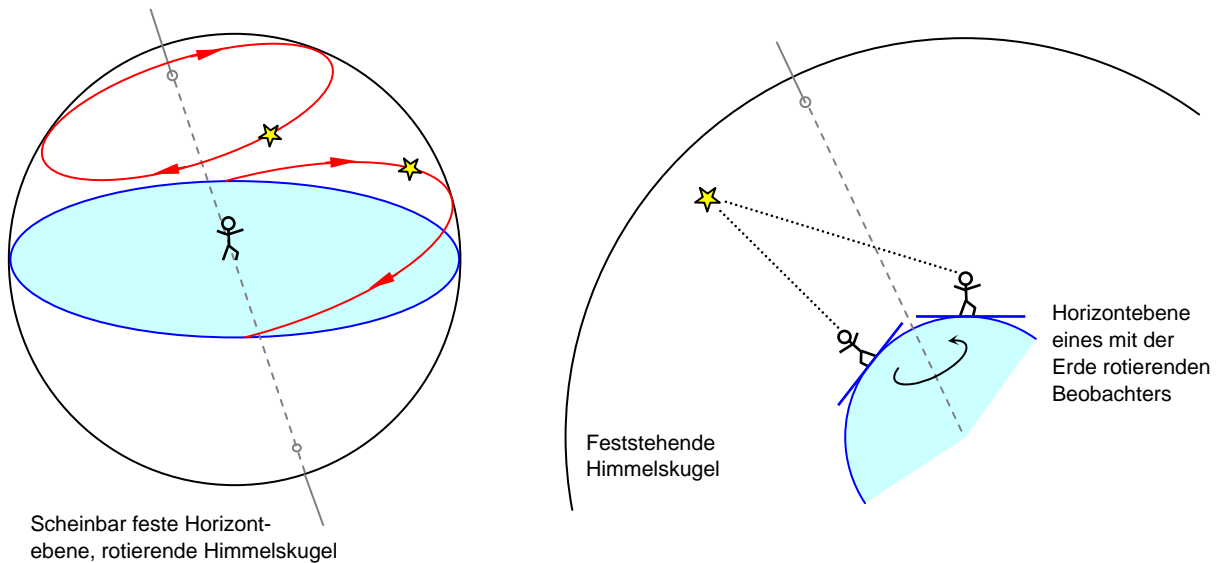


Ergänzungen

- Die Namen vieler Sternbilder des nördlichen Sternhimmels gehen auf die griechische Mythologie zurück, speziell die Tierkreissternbilder entstammen dem babylonischen Kulturkreis. Viele Sternbilder des südlichen Sternhimmels haben ihre Namen durch frühere Seefahrer erhalten, die sich an Gegenständen des Alltags orientierten. Seit 1928 sind die Sternbildgrenzen durch die *Internationale Astronomische Union* (IAU) so festgelegt, dass die insgesamt 88 Sternbilder die gesamte Himmelskugel lückenlos überdecken. Sämtliche Sterne innerhalb des jeweiligen Sternbildbereichs zählen zu diesem Sternbild.
- Die helleren Sterne werden in der Regel mit kleinen griechischen Buchstaben, gefolgt vom Genitiv des lateinischen Sternbildnamens, bezeichnet (zum Beispiel α Orionis). Reicht das griechische Alphabet nicht, werden Zahlen vorangestellt. Ferner gibt es verschiedene Sternkataloge mit eigenen Bezeichnungsweisen, in denen eine enorme Anzahl von Sternen erfasst sind. Viele der hellen, auffälligen Sterne haben Eigennamen, die oft aus dem arabischen Kulturraum stammen.

Die Rotation der Erde

Egal, ob man von der täglichen (scheinbaren) Bewegung der Sonne oder von einer Sternspuraufnahme ausgeht, die Ursache hierfür ist die Eigenrotation der Erdkugel.



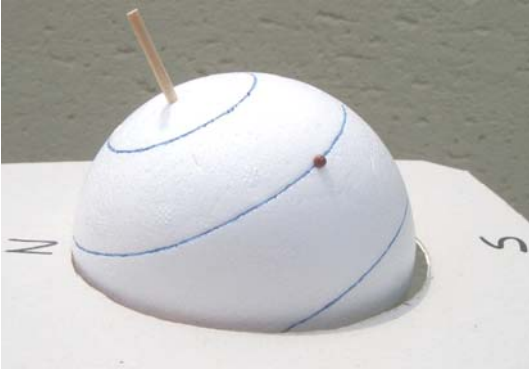
Für den auf der scheinbar festen Horizontebene ruhenden Erdbeobachter entsteht der subjektive Eindruck, dass die gesamte Himmelskugel um ihre durch die Himmelspole verlaufende Achse rotiert. Von außen gesehen, also bezüglich eines relativ zur Sonne festen Standpunkts, dreht sich die Erde unter der feststehenden Himmelskugel. Der Erdbeobachter nimmt samt Horizontebene und Zenit an dieser Rotation teil. Tatsächlich ändert also die Horizontebene ständig ihre Lage gegenüber dem Fixsternhintergrund.

Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts gibt es neben graphischen Darstellungen weitere Hilfsmittel, die hier kurz vorgestellt werden.

Eine erste Möglichkeit bietet ein Globus. Mit Doppelklebeband werden „der Beobachter“ (Spielmannchen) und die zugehörige Horizontscheibe (aus Pappe) befestigt. Der halb abgedunkelte Unterrichtsraum stellt die Himmelskugel dar, mit dem teilweise abgedeckten Tageslichtprojektor wird die Sonnenstrahlung simuliert. Damit lassen sich das „Abkippen“ des Horizonts nach Osten hin, der Sonnenauf- und -untergang, verschiedene Schattenlängen sowie die scheinbare Bewegung der Sonne und der Fixsterne sehr schön veranschaulichen.



Selbstverständlich kann, so an der Schule verfügbar, genauso gut ein Kleinplanetarium (z. B. das Baader-Schulplanetarium) oder ein Tellurium (z. B. das Tellurium N von Cornelsen Experimenta) verwendet werden.



Besonders einfach, aber nicht minder effektiv, ist die Verwendung einer Styroporkugel, bei der ein dünnes Holzstäbchen als Rotationsachse dient. Mit einer Stecknadel lässt sich auf der Kugel an beliebiger Stelle eine Horizontscheibe anbringen.

Fasst man die Kugel als Himmelskugel auf, eignet sie sich auch gut zur Darstellung von scheinbaren Sternbahnen bei Beobachtung in verschiedenen geographischen Breiten. Dazu wird die Kugel mit „Breitenkreisen“ versehen. Ein passend ausge-

schnittener Karton (siehe Bild) dient als Beobachtungshorizont. Der Beobachter befindet sich dann im Mittelpunkt der Kugel. Auf diese einfache Weise lassen sich für jede geographische Breite die Sternbahnen darstellen. Insbesondere wird deutlich, dass für Beobachter am Äquator der Himmelsäquator senkrecht auf die Horizontebene trifft und der Zenit auf dem Himmelsäquator liegt. Für Beobachter am Nordpol fallen Himmelsnordpol und Zenit zusammen. Somit wird auch plausibel, dass die Winkelhöhe des Himmelsnordpols über dem Horizont (für Beobachter auf der Nordhalbkugel) gleich der geographischen Breite des Beobachtungsortes ist (→ [CD](#), Aufgabenteil).

Auch der Bereich der *Zirkumpolarsterne* – das sind alle Sterne, deren scheinbare tägliche Bewegung immer oberhalb des Horizonts verläuft – lässt sich mit diesem Hilfsmittel sehr gut veranschaulichen.

Für den Nachweis der Rotation der Erde gibt es verschiedene Möglichkeiten. Am berühmtesten ist der 1851 von Foucault gezeigte Pendelversuch. Für die Vorführung im Pariser Pantheon verwendete er eine Pendelmass von 28 kg, die an einem 67 m langen Stahldraht hing. Dieses Thema eignet sich wunderbar für eigenständige Recherchen der Schüler. Man kann den Versuch natürlich auch als Demonstrationsversuch zeigen. Sehr eindrucksvoll ist er im Deutschen Museum in München zu sehen.

Ergänzung

Für die eindeutige Beschreibung der Position eines Sterns auf der Sphäre ist ein astronomisches Koordinatensystem erforderlich. Eine Besprechung der Koordinatensysteme im Unterricht ist nicht vorgesehen. Interessierte Kolleginnen und Kollegen finden ausführliche Darstellungen zum Beispiel in [L5], [L6], [L7] und [L9].

Quellen:

Lerner, „Grundkurs Astronomie“, Bayerischer Schulbuch Verlag, München 1989

Teichmann, „Wandel des Weltbildes“, Teubner Verlag, Stuttgart Leipzig 1999

Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995

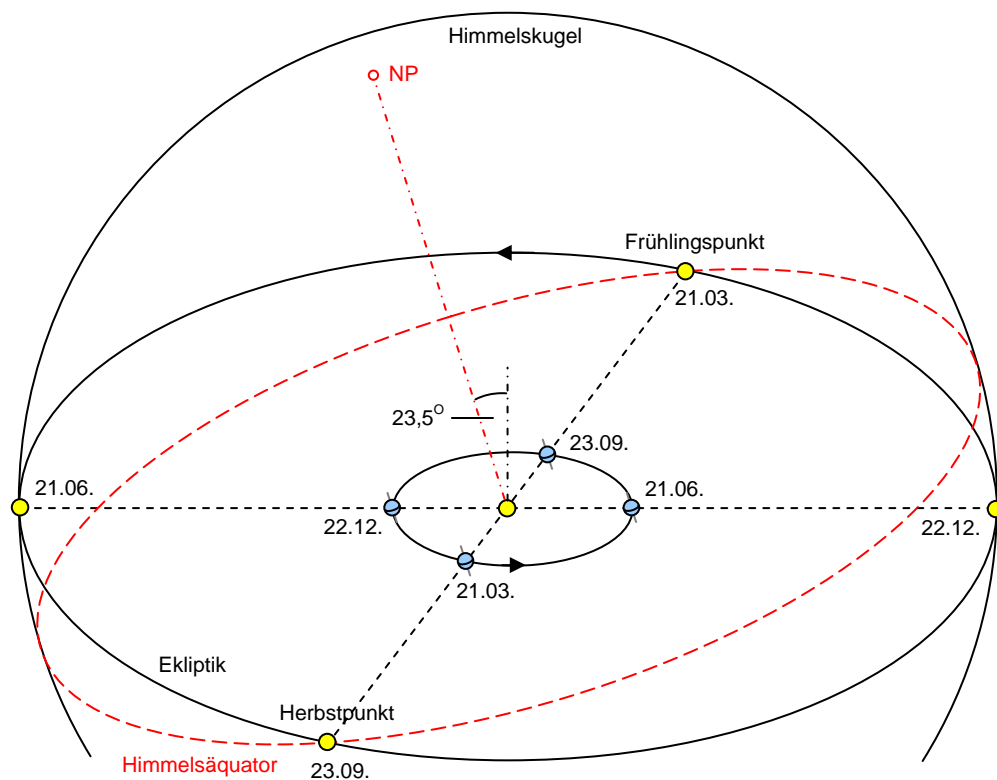
Die Bewegung der Erde um die Sonne

Die im Sommer – im Vergleich zum Winter – deutlich höher über dem Horizont stehende Sonne und der unterschiedliche Anblick des Sternhimmels zu verschiedenen Jahreszeiten sind eine Folge des jährlichen Umlaufs der Erde um die Sonne, der auf einer nahezu kreisförmigen Ellipsenbahn erfolgt.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, nebenher die Bahngeschwindigkeit der Erde abzuschätzen: Sie beläuft sich immerhin auf fast $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \approx 107\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Die Rotationsachse der Erde bildet mit dem Lot auf die Erdbahnebene einen Winkel von $23,5^\circ$. Die räumliche Lage der Rotationsachse ändert sich beim Umlauf der Erde um die Sonne (in kurzen Zeiträumen) nicht. Entsprechend ist auch die Äquatorebene gegen die Bahnebene um $23,5^\circ$ geneigt.

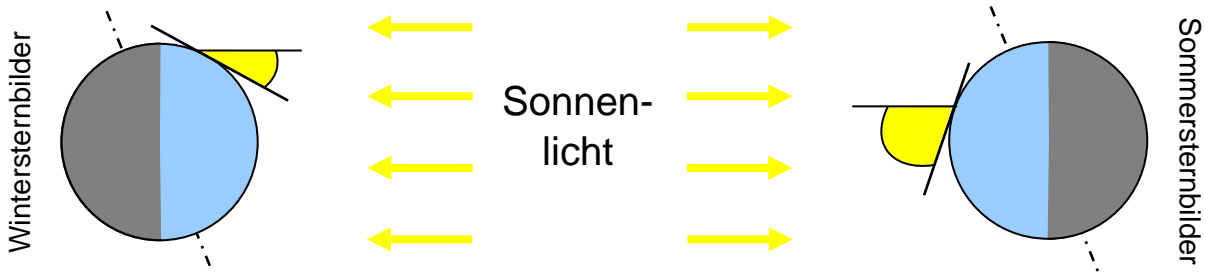
Von der Erde aus gesehen beschreibt die Sonne bei dieser Bewegung scheinbar eine Bahn auf der Himmelskugel, die als *Ekliptik* bezeichnet wird. Die Ekliptik ist also nichts anderes als die Schnittlinie der Erdbahnebene mit der Himmelskugel.



Der Himmelsäquator und die Ekliptik schneiden sich im Frühlings- und im Herbstpunkt. Der Frühlingspunkt ist dadurch gekennzeichnet, dass ihn die Sonne in Bezug auf den Himmelsäquators „aufsteigend“ passiert, während sie den Herbstpunkt „absteigend“ durchläuft. Im Verlauf des Sommerhalbjahrs vom 21.3. bis zum 23.9. befindet sich die Sonne scheinbar oberhalb des Himmelsäquators, während des Winterhalbjahrs darunter. Sie durchläuft im Lauf eines Jahres scheinbar zwölf im Bereich der Ekliptik liegende Sternbilder, die als Tierkreissternbilder bekannt sind.

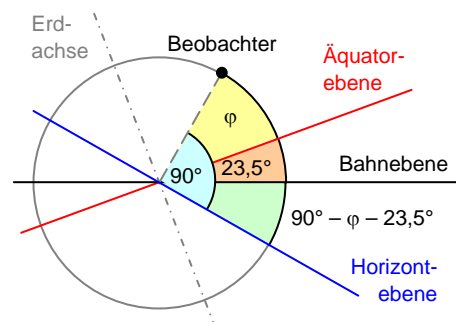
In Verbindung mit der Neigung der Erdachse hat die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne mehrere Konsequenzen. Eine davon ist, dass sich im Lauf des Jahres die beobachtbaren Sternbilder verändern. So hat jede Jahreszeit ihre typischen Sternbilder (→ Beobachtungsobjekte S. 120, 121). Ebenso verändern sich der Auftreffwinkel der Sonnenstrahlung auf der Erde sowie die Dauer von Tag und Nacht. Mit dem Bader-Schulplanetarium und

einer Sonnenprojektionslinse lässt sich die jährliche Bewegung der Sonne besonders eindrucksvoll veranschaulichen. Die folgenden Graphiken und Bilder können als Ergänzung bzw. Alternative verwendet werden.

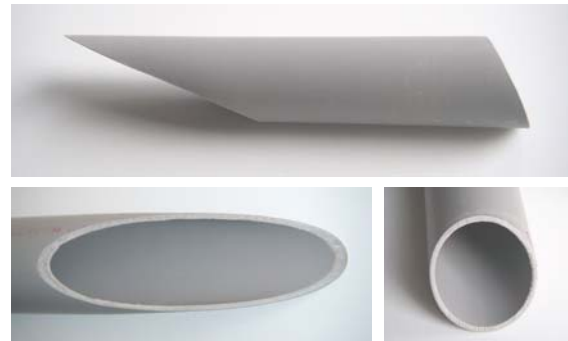


Für einen Beobachter, der sich auf der geographischen Breite φ befindet, hat der Himmelsäquator eine maximale Winkelhöhe von $90^\circ - \varphi$ gegenüber dem Horizont. Da die Sonne zum Frühlingsanfang (um den 21.03.) und zum Herbstbeginn (um den 23.09.) scheinbar auf dem Himmelsäquator liegt, ist ihre maximale Höhe über dem Horizont (die sog. obere Kulminationshöhe) also ebenfalls $90^\circ - \varphi$.

Aufgrund der Neigung der Erdachse liegt die Sonne zum Zeitpunkt der Wintersonnwende $23,5^\circ$ unter dem Himmelsäquator (Skizze) und erreicht damit eine obere Kulminationshöhe von $90^\circ - \varphi - 23,5^\circ$. Entsprechend folgt für den Zeitpunkt der Sommersonnwende eine obere Kulminationshöhe von $90^\circ - \varphi + 23,5^\circ$.



Für eine geographische Breite von 48° bedeutet das zum Beispiel, dass die Sonnenstrahlung am Tag der Wintersonnwende höchstens unter einem Winkel von $18,5^\circ$ auf den horizontalen Boden auftrifft. Zur Sommersonnwende beträgt der Auftreffwinkel maximal $65,5^\circ$. Eine Veranschaulichung ist mit einem Plastik- oder Papprohr möglich, dessen Enden im jeweils richtigen Winkel schräg abgesägt wurden. Stellt man es auf die jeweilige Schnittfläche, lässt sich für die

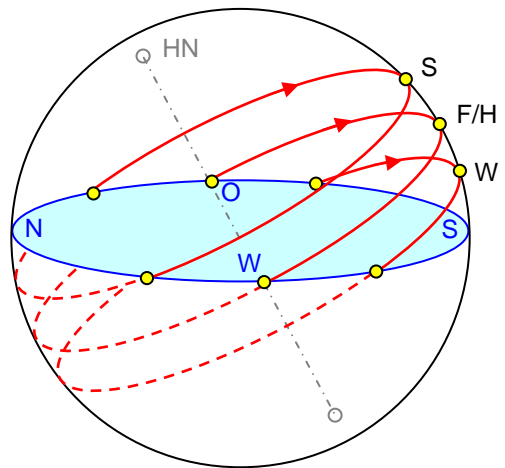


Mittagszeit der besagten Tage der Einfall des Sonnenlichts parallel zur Zylinderachse gut nachvollziehen. Insbesondere sieht man sehr schön, dass sich die durch das Rohr gelangende Strahlung im Sommer auf einen deutlich kleineren Flächeninhalt verteilt. Hierin und in der größeren Tageslänge liegt der Grund für die stärkere Bodenerwärmung im Sommer und nicht, wie vielfach fälschlicherweise angenommen, in einer geringeren Distanz zur Sonne. Tatsächlich ist die Sonne Anfang Juli etwa 152 Millionen km von der Sonne entfernt, während die Entfernung Anfang Januar „nur“ 147 Millionen km beträgt.

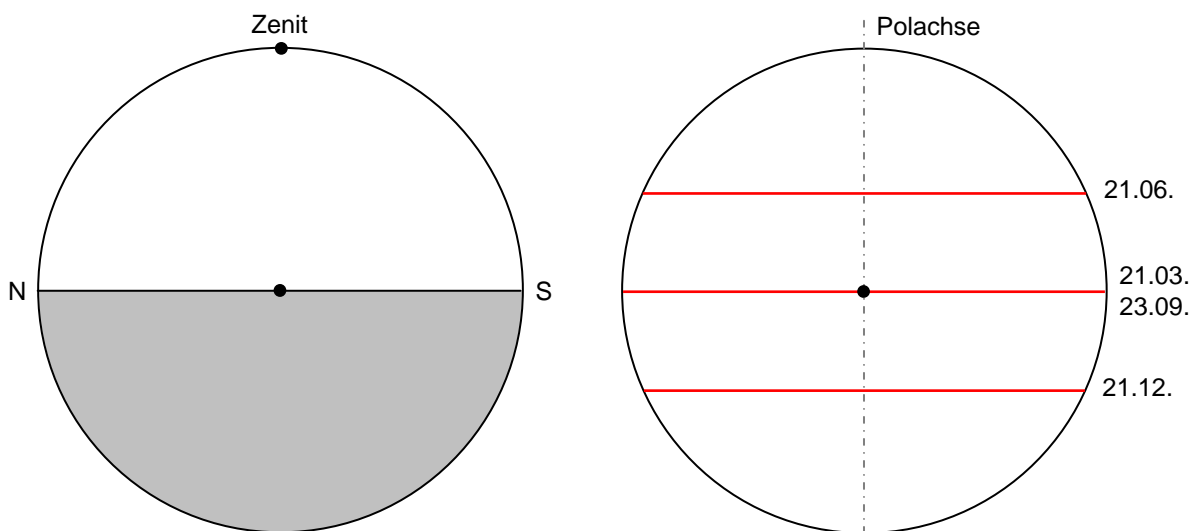
Die im Verlauf des Jahres variierende Tageslänge lässt sich mit einem Globus gut zeigen, bei dem ein passend ausgeschnittener Karton die Hell-Dunkel-Grenze darstellt. An einem mit Klebeband markierten Breitenkreis sind die unterschiedlichen Längen des Tag- und des Nachtbogens gut zu sehen. Als Ersatz für den Globus kann eine Styroporkugel mit eingezeichneten Breitenkreisen verwendet werden.



Die nebenstehende Graphik zeigt für den Zeitpunkt der Sommersonnwende (S), des Frühlings- bzw. Herbstbeginns (F/H) und der Wintersonnwende (W) jeweils die scheinbare Sonnenbahn auf der Sphäre im Verlauf eines Tages. Die blau gefärbte Horizontebene ist mit den Himmelsrichtungen beschriftet. Die durchgezogenen roten Linien stellen die jeweiligen Tagbögen der Sonne dar, deren unterschiedliche Länge deutlich erkennbar ist. Auch die vom Zeitpunkt abhängigen Auf- und Untergangsorte sind gut zu erkennen.



Eine alternative Darstellungsmöglichkeit bieten die zwei folgenden Graphiken, die als Teile einer Overlayfolie zu verstehen sind. Mit ihr lassen sich für beliebige geographische Breiten die scheinbaren täglichen Sonnenbahnen zwischen Sommer- und Wintersonnwende im Querschnitt zeigen. Folie 2 mit den Sonnenbahnen legt man über die Folie 1 mit der feststehenden Horizontebene. Durch Drehung von Folie 2 um den gemeinsamen Mittelpunkt wird die gewünschte geographische Breite eingestellt. Mit diesem Hilfsmittel ist es auch möglich, kurz auf die Wendekreise, die Polarkreise oder die Mitternachtssonne einzugehen.



Die folgenden drei Photographien von Sonnenuntergängen wurden zur Wintersonnwende, zum Frühlingsanfang und zur Sommersonnwende jeweils vom gleichen Standort aus erstellt. Sie sind so aneinandergesetzt, dass der Landschaftsverlauf naturgetreu wiedergegeben ist.

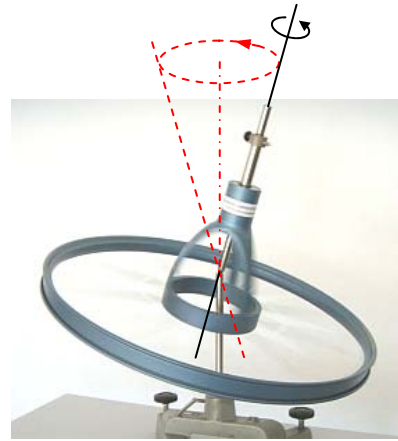


Wintersonnwende

Frühlingsanfang

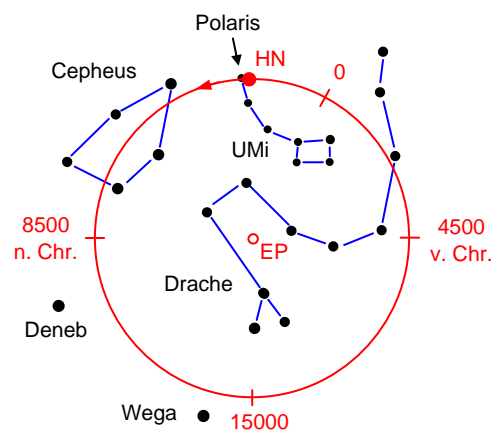
Sommersonnwende

Die rotierende Erde kann physikalisch als Kreisel aufgefasst werden. Die Rotationsachse eines Kreisels behält ihre Lage im Raum nur dann unverändert bei, wenn der Kreisel kräftefrei ist. Tatsächlich ist die Erde nicht völlig kräftefrei. Aufgrund ihrer Rotation ist sie an den Polen abgeplattet. Die an ihrem Äquatorwulst angreifenden Gravitationskräfte von Sonne und Mond versuchen die Rotationsachse „aufzurichten“. Das führt zu einer Ausweichbewegung, der *Präzession*. Dabei beschreibt die Rotationsachse einen (Doppel-)Kegel, dessen Spitze im Erdmittelpunkt liegt. Ein voller Umlauf der Achse um den Kegelmantel dauert ca. 25 700 Jahre.



Aufgrund der Präzession der Erdachse verändert sich die Position der Himmelspole bezüglich des Fixsternhintergrunds. Somit ändert auch die auf der Erdachse senkrecht stehende Äquatorebene ihre Lage entsprechend. Als Folge davon wandern der Frühlings- und der Herbstpunkt entlang der Ekliptik.

Die nebenstehende Graphik stellt die Positionsänderung des Himmelsnordpols (HN) dar. Er wird sich dem Polarstern bis zum Jahr 2100 weiter nähern und sich ab diesem Zeitpunkt von ihm entfernen. Der Ekliptiknordpol (EP) ändert seine Lage nicht.



Ergänzungen

- Um zu ermitteln, in welchem Sternbild die Sonne an einem bestimmten Tag zu sehen ist, muss man beobachten, welches Sternbild sich um Mitternacht im Süden im Bereich der Ekliptik befindet. Die Sonne befindet sich zu diesem Zeitpunkt im Norden unterhalb des Horizonts. Sie ist folglich in dem Sternbild zu finden, das dem, welches man um Mitternacht beobachtet hat, auf der Ekliptik genau gegenüber liegt.
- Der Winkelabstand eines Objekts vom Himmelsäquator heißt Deklination δ . Zusammen mit der geographischen Breite φ des Beobachtungsortes erhält man für die obere Kulminationshöhe h des Objekts $h = \delta + (90^\circ - \varphi)$.
- In Hinblick auf eine klar ausgeprägte Vorstellung zur Himmelskugel sollte die Präzession der Erdachse mit ihrem Einfluss auf die Lage der Himmelspole und des Himmelsäquators nicht gleich bei der Einführung dieser Begriffe erfolgen, sondern erst am Schluss dieses Abschnitts.
- Die zwölf Tierkreissternbilder müssen deutlich von den Tierkreiszeichen unterschieden werden. Bei den Tierkreiszeichen handelt es sich um eine Einteilung der Ekliptik in zwölf gleich große Abschnitte, die auf die babylonische Kultur zurückgeht. Die Lage der Tierkreiszeichen ist mit dem Frühlingspunkt verknüpft, an dem das Tierkreiszeichen Widder beginnt. Der Frühlingspunkt verlagert sich aufgrund der Präzession der Erdachse in ca. 2140 Jahren um 30° , also genau um ein Tierkreiszeichen. Deshalb stimmen heute die Positionen der Tierkreiszeichen nicht mehr mit denen der fest mit der Himmelskugel verbundenen Tierkreissternbilder überein.
- Eine Behandlung der Physik des Kreisels kann im Astrophysik-Unterricht nicht erfolgen. Es lassen sich jedoch alle wichtigen Phänomene mit einfachen Spielzeugkreiseln anschaulich demonstrieren. Deutlich eindrucksvoller ist ein Kreisel, den man sich aus einem Vorderrad eines Fahrrads baut. Mit zwei passenden Metallrohren, die man fest auf die Radachse montiert, kann man das schnell rotierende Rad gut in die Hand nehmen. Beim Versuch, die Rotationsachse zu kippen, wird die Kraft spürbar, die zur Präzessionsbewegung führt.

Quellen und weiterführende Literatur:

Beckmann, Epperlein, „Astronomie Grundkurs“, Manz Verlag, München 1989

Gondolatsch, Steinacker, O. Zimmermann, „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990

Herrmann, Schwarz, „Basiswissen Schule Astronomie“, paetec, Berlin, Bibliographisches Institut, Mannheim 2001

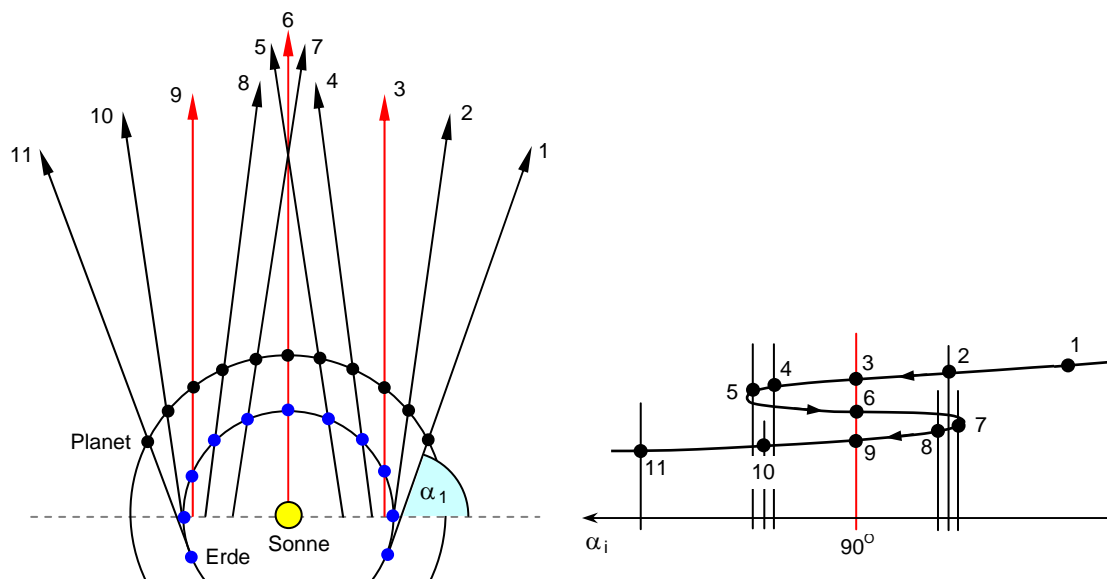
Lerner, „Grundkurs Astronomie“, Bayerischer Schulbuch Verlag, München 1989

Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995

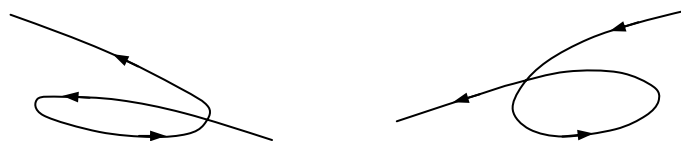
Die Bahnschleifen der Planeten

Je weiter ein Planet von der Sonne entfernt ist, desto kleiner ist seine Bahngeschwindigkeit. Außerdem sind die Bahnebenen der Planeten geringfügig gegen die Ekliptik geneigt. Deshalb erscheinen die Planetenbahnen von der Erde aus gesehen sehr kompliziert. In der Nähe der Oppositionsstellung treten scheinbar Schleifenbahnen auf, bei denen die Planeten rechtläufige Bewegungen (Richtung Osten) und rückläufige Bewegungen (Richtung Westen) ausführen.

Zur Veranschaulichung des Schleifenverhaltens dient die folgende Graphik, für die vereinfachend kreisförmige Planetenbahnen und eine Bewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit angenommen werden. Um eine korrekte Darstellung zu erhalten, die den Fixsternhintergrund in unendlicher Entfernung voraussetzt, muss man – etwas abstrakt – die zur jeweiligen Planetenposition gehörenden Sichtwinkel α_i antragen. Dann findet man auch die Positionen 3, 6 und 9 aufgrund der parallelen Sichtlinien unter dem gleichen Winkel.



Je nach Bahnschräge und Deklination können sich auch andere Schleifenformen ergeben:



Ergänzung

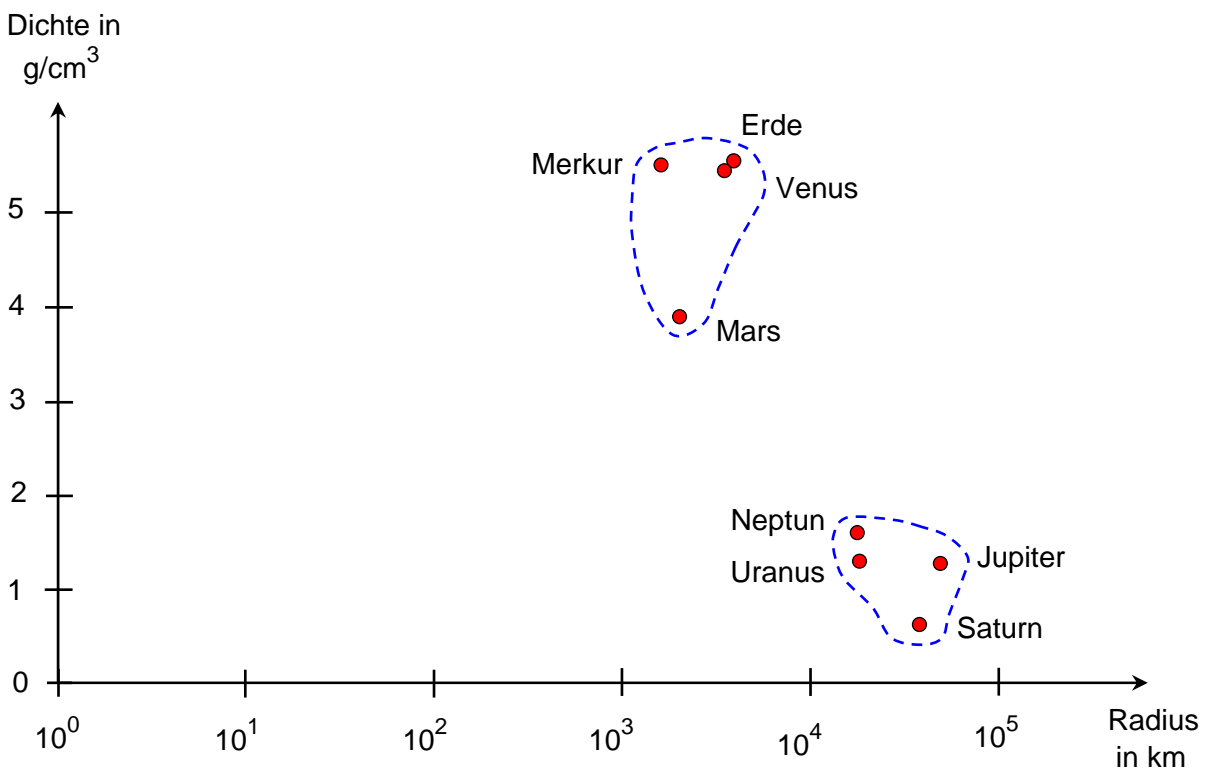
Erfolgt die scheinbare Bewegung eines Planeten nach Osten, wird sie *rechtläufig* genannt, erfolgt sie nach Westen, wird sie als *rückläufig* bezeichnet.

1.2 Überblick über das Sonnensystem

Überblick über den Aufbau des Sonnensystems

Für den Einstieg in diesen Abschnitt lässt sich zum Beispiel unter www.eso.org/esopia oder <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod> reichhaltiges Bildmaterial zu den einzelnen Objekten des Sonnensystems finden. Damit kann der Überblick über den Aufbau des Sonnensystems sehr anschaulich gestaltet werden.

Um die Einteilung in erdähnliche und jupiterähnliche Planeten plausibel zu machen, ist das folgende Radius-Dichte-Diagramm hilfreich. Es wird als Folie aufgelegt oder im Rahmen eines Arbeitsauftrags durch die Schülerinnen und Schüler selbst erstellt.



Unter Verwendung der Übersicht auf der folgenden Seite wird die Struktur des Planetensystems deutlich. An dieser Stelle des Unterrichts ist auch ein erstes Eingehen auf Zwergplaneten, Kometen, Meteore und sonstige Kleinkörper zwanglos möglich. Insbesondere sollte den Schülerinnen und Schülern der Unterschied zwischen Planet und Zwergplanet plausibel gemacht werden.

Erdähnliche Planeten	<p>Merkur, Venus, Erde, Mars</p> <ul style="list-style-type: none"> • feste Oberfläche • verhältnismäßig kleiner Radius • verhältnismäßig kleine Masse • vergleichsweise große Dichte • Sonnenentfernung etwa 0,4 AE bis 1,5 AE (entspricht etwa 3,3 bis 12 Lmin)
Asteroidengürtel	<p>Ceres (Zwergplanet), Pallas, Juno, Vesta, usw.</p> <ul style="list-style-type: none"> • liegen zwischen den inneren und den äußeren Planeten
Jupiterähnliche Planeten	<p>Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gasplaneten • verhältnismäßig großer Radius • verhältnismäßig große Masse • vergleichsweise kleine Dichte • Sonnenentfernung etwa 5 AE bis 30 AE (entspricht etwa 42 Lmin bis 4 Lh)
Kuiper-Gürtel	<p>Pluto (Zwergplanet), Quaoar, Sedna, Eris (Zwergplanet), usw.</p> <ul style="list-style-type: none"> • scheibenförmiger Materiegürtel • jenseits der Neptunbahn, reicht bis etwa 50 AE (entspricht etwa 4 bis 7 Lh)
Oortsche Wolke	<ul style="list-style-type: none"> • kugelförmige Kometenwolke um die Sonne • geschätzte Ausdehnung zwischen 40000 und 50000 AE (entspricht etwa 230 bis 290 Ld)

Zur Information ist an dieser Stelle die Resolution 5A der Internationalen Astronomischen Union (IAU) vom 24. August 2006 zur Definition von Planeten wiedergegeben.

„The IAU therefore resolves that planets and other bodies in our Solar System, except satellites, be defined into three distinct categories in the following way:

(1) A "planet" [1] is a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.

(2) A "dwarf planet" is a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape [2], (c) has not cleared the neighbourhood around its orbit, and (d) is not a satellite.

(3) All other objects [3], except satellites, orbiting the Sun shall be referred to collectively as "Small Solar-System Bodies".

 [1] The eight planets are: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune.

[2] An IAU process will be established to assign borderline objects into either dwarf planet and other categories.

[3] These currently include most of the Solar System asteroids, most Trans-Neptunian Objects (TNOs), comets, and other small bodies.”

Hieraus geht insbesondere hervor, dass der Begriff „Kleinplanet“ nicht mehr verwendet werden soll. Ein detailliertes Eingehen auf diese Definition ist zwar sicher nicht erforderlich, jedoch sollte der Unterschied zwischen Planet und Zwergplanet (insbesondere im Zusammenhang mit Pluto) deutlich werden.

Ergänzung

Im Juni 2008 wurde von der IAU die Kategorie der Plutoiden eingeführt. Dabei handelt es sich um eine Unterklasse der Zwergplaneten. Zu den Plutoiden zählen alle Zwergplaneten, deren große Halbachse größer als die von Neptun ist.

Die Frage, wieso alle inneren Planeten erdähnlich und alle äußeren Planeten jupiterähnlich aufgebaut sind, führt unmittelbar auf das Problem der Planetenentstehung.

Die Entstehung des Sonnensystems

Die Entdeckung von extrasolaren Planeten und die damit verbundenen Beobachtungen haben zu neuen Modellansätzen zur Entstehung unseres Sonnensystems geführt. Eine prägnante Behandlung dieses Themas ist ebenso interessant wie sinnvoll, weil sich dann verschiedene Fragen zu den Eigenschaften des Sonnensystems problemlos beantworten lassen. Die folgende Darstellung ist als Information gedacht und sollte den Schülerinnen und Schülern in gekürzter Form dargeboten werden.

Zunächst soll betont werden, dass jedes plausible Modell aus den grundlegenden Annahmen in logischer Konsequenz auf die heute bekannten Eigenschaften des Sonnensystems führen muss.

Vorrangig sind folgende Fakten zu nennen:

- Alle Planeten bewegen sich auf fast kreisförmigen Bahnen, mit gleichem Drehsinn und nahezu in einer Ebene um die Sonne.
- 99,9 % der Gesamtmasse des Sonnensystems sind in der Sonne konzentriert, auf die Planeten und den Rest entfallen nur 0,1 %.
- Die Planeten haben am gesamten Drehimpuls des Systems einen Anteil von 99,5 % (vor allem Jupiter), die Sonne dagegen nur 0,5 %.
- Die inneren Planeten bestehen aus festen Anteilen, die äußeren Planeten dagegen im Wesentlichen aus Gas und Eis.

Interstellare Wolke und Gravitationskollaps

Nach derzeitigem Wissensstand ist die Bildung von Planeten unmittelbar mit der Entstehung eines Sterns verbunden. Dabei ist zunächst von einer interstellaren Gas- und Staubwolke auszugehen, die zu kontrahieren beginnt, sofern ihre Eigengravitation größer als der innere Gasdruck ist. Durch einen zusätzlich notwendigen äußeren Einfluss (Ausdehnungsdruck einer heißen Gasregion, Dichtewelle durch die Milchstraße, Stoßwelle einer nahen Supernova-Explosion) setzt ein Gravitationskollaps ein, der zur Bildung der *Protosonne*, umgeben von einer Gas- und Staubscheibe, führt. Durch Gravitationskräfte werden die Massen ober- und unterhalb des Massenzentrums auf dieses zu beschleunigt. Gleichzeitig behalten sie ihren Drehimpuls bei, was eine Zentrifugalbeschleunigung zur Folge hat. Beides zusammen führt zu einer Massenkonzentration in der Bahnebene, eine abgeflachte Scheibe bildet sich aus.

Etwa 10^5 bis 10^6 Jahre nach Einsetzen des Gravitationskollapses hat sich die Protosonne zu einem dichten Objekt entwickelt, der Zentralbereich der Scheibe ist durch den Kontraktionsprozess in schnelle Rotation geraten (Pirouetteneffekt). Vermutlich durch den Einfluss von Magnetfeldern überträgt sich der wesentliche Anteil des Drehimpulses auf die äußeren Regionen. Die Gesamtmasse der Scheibe beträgt weniger als 0,1 Sonnenmassen, der Radius der Scheibe hat eine Ausdehnung von etwa 50 bis 100 AE. Die Temperatur liegt in der inneren Scheibenregion bei mehr als 1000 K, am Scheibenrand dagegen nur bei etwa 50 K. Auch die Dichte der Staub- und Gasteilchen nimmt nach außen hin deutlich ab, ist aber höher als in der anfänglichen Molekülwolke.

Durch die hohen Temperaturen in der Nähe der Protosonne wird der Gasanteil (vor allem Wasserstoff und Helium sowie weitere massearme Elemente) nach außen getrieben, während sich Metall- und Gesteinspartikel in diesem Bereich halten können. Bei gegenseitigen Stößen vergrößern sich diese Partikel durch ein „Aneinander-haften-Bleiben“ sowie „mechanisches Verhaken“ zu länglichen Gebilden. Es wird angenommen, dass sich aus den anfänglich nur $0,1 \mu\text{m}$ großen Partikeln Klumpen mit Durchmessern bis zu einigen 10 cm bilden. Es ist derzeit (2008) noch in Diskussion, wie daraus die *Planetesimale* (Körper von bis zu 200 km Ausmaß) entstehen.

Diese Planetesimale können nun durch Kollisionen zu Planetenkernen von Marsgröße anwachsen und sich schließlich zu Planeten weiterentwickeln oder durch Zertrümmerung die Scheibe mit neuem, teilweise aufgeschmolzenem und dann erstarrtem Ausgangsmaterial versorgen.

Spätestens nach Abschluss der Entstehungsphase der Sonne, also mit dem Einsetzen der Wasserstofffusion in deren Zentralbereich, setzt auch ein kräftiger Sonnenwind ein, der Gas- und Staubreste aus dem Innenbereich der Scheibe nach außen treibt.

Die Entstehung der jupiterähnlichen Planeten

Infolge der niedrigen Temperaturen kondensieren im Außenbereich der Scheibe auch flüchtige Stoffe wie zum Beispiel Wasser. Dies führt zur Erzeugung von vereisten, mit Staub durchsetzten Planetesimalen, aus denen sich ab Entfernungen von etwa 5 AE Eis-Staub-Planetenkerne bilden. Ist genügend Material vorhanden, können daraus Körper bis zu 10 Erdmassen entstehen, deren Schwerkraft das umgebende Gas anzieht. In verhältnismäßig kurzer Zeit ist dann der massive Planetenkern von einer dichten Gasschicht aus Wasserstoff und Helium umgeben. Ein derartiger Aufbau wird heute bei Jupiter vermutet.

Hat sich erst einmal ein derart massereicher Planet gebildet, beeinflusst er zusammen mit der Protosonne die weitere Planetenbildung deutlich. Infolge der nur noch geringen Gas- und Staubbichte in der Umgebung seiner Bahn können weitere Gasplaneten mangels Ausgangsmaterial nur noch verhältnismäßig langsam entstehen. Außerdem ergeben sich für die weiteren Gasplaneten deutlich kleinere Massen (im Vergleich zu Jupiter mit 318 Erdmassen hat Saturn 95 Erdmassen, Uranus 15 Erdmassen und Neptun 17 Erdmassen).

Die Entstehung der erdähnlichen Planeten

Da im Innenbereich der protoplanetaren Scheibe die flüchtigen Stoffe nun weitgehend fehlen, dauert auch hier die Bildung von massiven Planetenkernen deutlich länger. Für den Zeitraum der Entwicklung der erdähnlichen Planeten nimmt man heute einen Zeitraum von einigen 10^7 Jahren an.

Durch Kollisionen und die damit verbundene Massenzunahme bzw. -verdichtung sowie durch den Zerfall der im Inneren enthaltenen radioaktiven Elemente kommt es zum Aufschmelzen der jungen Planeten. In dieser Phase entstand vor ca. 4,5 Milliarden Jahren

vermutlich infolge des Zusammenpralls der Protoerde mit einem marsgroßen Objekt das System Erde – Mond.

Die Überreste der Planetenentstehung

Ein einfaches Modell geht davon aus, dass nach der Bildung der Planeten noch viele „unverbrauchte“ Planetesimale sowie kleine Körper im neu entstandenen Sonnensystem verbleiben.

Etliche Körper aus den äußeren Bereichen werden durch den Gravitationseinfluss von Jupiter in Richtung Sonne abgelenkt und kollidieren zum Teil mit den erdähnlichen Planeten sowie dem Erdmond. Dieses „Große Bombardement“ klingt nach einer Dauer von einigen 100 Millionen Jahren ab. Ein anderer Teil der noch vorhandenen festen Körper sammelt sich im Asteroidengürtel. Hier können Zusammenstöße eine Zerkleinerung zu Meteoriten, kleinen Körpern und interplanetarem Staub bewirken.

Bei Kometen handelt es sich sehr wahrscheinlich um Planetesimale aus Eis und Staub, die sich in den kälteren Bereichen der planetarischen Scheibe gebildet haben und von den entstandenen Planeten nicht „aufgesammelt“ wurden. Während die kurzperiodischen Kometen wohl aus dem Kuiper-Gürtel (scheibenförmig) stammen, kommen die langperiodischen Kometen eventuell aus der vermuteten Oortschen Wolke. In dieser könnten sich Planetesimale angesammelt haben, die durch den Einfluss von Jupiter zwar aus der protoplanetarischen Scheibe herausgeschleudert wurden, sich dem Gravitationseinfluss des Sonnensystems aber nicht vollständig entziehen konnten.

Bemerkung

Im Zusammenhang mit der Entstehung des Planetensystems gibt es zahlreiche Fragen, die sich momentan weder durch Beobachtung noch durch Modellbildung beantworten lassen. Es darf mit Spannung erwartet werden, welche Erkenntnisse sich aus den geplanten Beobachtungsprojekten zusammen mit verbesserten Modellansätzen ergeben.

Quellen und weiterführende Literatur:

Gottwald, „Die Entstehung unseres Planetensystems“, *Astronomie + Raumfahrt* 42 [2005] 5, S. 23 ff.

Hahn, „Unser Sonnensystem“, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2004

Bestimmung von Massen und Bahnparametern im Sonnensystem

Die grundlegende Frage ist, aus welchen Messungen und Berechnungen man konkrete Daten zu Umlaufdauern, Entfernungen, Bahngeschwindigkeiten und Massen der Objekte im Sonnensystem erhält. Hier erweisen sich sowohl die Keplerschen Gesetze wie auch das Gravitationsgesetz von Newton als fundamentale Hilfsmittel.

Da diese Gesetze bereits in Jahrgangsstufe 10 behandelt wurden (→ Ph 10.1), ist eine kurze, möglichst eigenständige Wiederholung durch die Schülerinnen und Schüler unter Verwendung des Lehrbuchs, passender Internet-Seiten oder geeigneter Aufgaben empfehlenswert.

Die Grundkenntnisse zu Ellipsen lassen sich z. B. unter Verwendung einer dynamischen Geometrie-Software anschaulich wiederholen (→ Anmerkungen in Kapitel 3.1 sowie **CD** Kapitel_1, Ellipse_allgemein.ggb).

Die Keplerschen Gesetze

Die Keplerschen Gesetze gelten für alle Körper, die eine Zentralmasse umlaufen, wobei nur das 2. Keplersche Gesetz uneingeschränkt gültig ist. Das 1. Keplersche Gesetz zeigt Einschränkungen bei den Planetenbahnen, die nicht exakt geschlossen sind. Ein erster Anteil dieser *Periheldrehung* ist auf Störungen durch massereiche Planeten zurückzuführen (er macht bei Merkur 532'' und bei der Erde 1165'' pro Jahrhundert aus), ein zweiter auf Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie (dieser beläuft sich bei Merkur auf 43'' und bei der Erde auf 3,8'' pro Jahrhundert).

Quelle:

Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995

Beim 3. Keplerschen Gesetz ist die Masse m des umlaufenden Körpers im Vergleich zur Masse M des Zentralkörpers zu beachten. Ist m gegenüber M nicht vernachlässigbar, liegt im einfachsten Fall ein Zweikörperproblem vor. Dann gelten die beiden ersten Keplerschen Gesetze unverändert, lediglich im 3. Keplerschen Gesetz ist die Gesamtmasse zu verwenden. Dies zeigt die folgende Überlegung, bei der von kreisförmigen Bahnen ausgegangen wird.

Die Zentralkräfte für die beiden Körper sind

betragsgleich, also ist $M\omega_1^2 r_1 = m\omega_2^2 r_2$.

Wegen $\omega_1 = \omega_2$ (da gleiche Umlaufdauer) folgt

zunächst die „Schwerpunktsgleichung“

$Mr_1 = mr_2$ und daraus mit $r_1 + r_2 = r$

der Ausdruck $(M + m) \cdot r_1 = m r$.

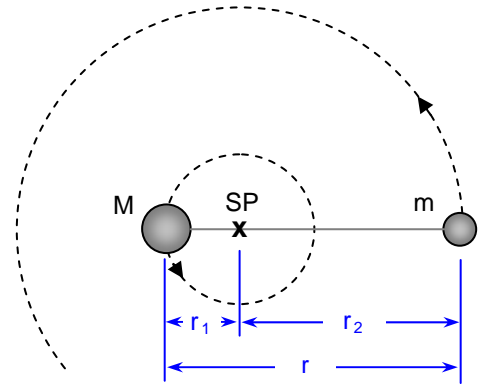
Für beide Massen ist der Betrag der

Zentripetalkraft gleich der Gravitationskraft,

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = M \cdot \omega^2 \cdot r_1 = M \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{m}{M+m} \cdot r.$$

Hieraus folgt schließlich die Erweiterung des 3. Keplerschen Gesetzes: $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot (M+m)}$.

Daran lässt sich ablesen, dass $\frac{T^2}{r^3}$ nur bei einer sehr großen Zentralmasse M für alle Planeten annähernd gleich ist.



Ergänzung

Eine Herleitung der Keplerschen Gesetze ist nicht vorgesehen. Interessierte Kolleginnen und Kollegen finden eine kurze Ableitung zum Beispiel in [L16], S. 3 ff.

Synodische und siderische Umlaufzeit

Die *synodische Umlaufzeit* T_{syn} ist für einen oberen Planeten die Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Oppositionen. Für einen unteren Planeten ist es die Zeitdauer zwischen zwei unteren (oder zwei oberen) Konjunktionen. Die synodische Umlaufzeit kann unmittelbar gemessen werden.

Die *siderische Umlaufzeit* T_{sid} ist die Zeitdauer, in der eine vom Sonnenzentrum durch das Planetenzentrum gezogene Halbgerade einen 360° -Winkel durchläuft. Es ist also die Zeitspanne für einen vollen Umlauf eines Planeten, bezogen auf den Fixsternhintergrund. Sie ist in Keplers 3. Gesetz zu verwenden.

Da sich die Erde selbst in Bewegung befindet, kann die siderische Umlaufzeit nicht direkt gemessen werden. Sie ergibt sich jedoch rechnerisch aus $\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{syn}}}$ für obere

bzw. aus $\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} + \frac{1}{T_{\text{syn}}}$ für untere Planeten, wobei T_E die Umlaufdauer der Erde ist.

Herleitung des Zusammenhangs für obere Planeten und Kreisbahnen:

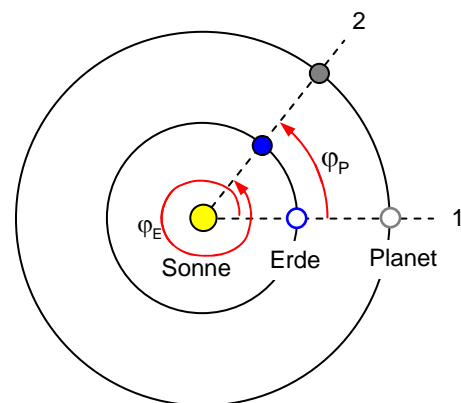
Der Planet befindet sich in Oppositionsstellung (1). Die Zeitspanne bis zur darauffolgenden Opposition (2) ist gerade T_{syn} . Der Planet durchläuft in dieser Zeit den Winkel φ_P , während die Erde den Winkel $\varphi_E = \varphi_P + 2\pi$ durchläuft.

Also gilt $\varphi_P = \varphi_E - 2\pi$, woraus sich zusammen mit den zugehörigen Winkelgeschwindigkeiten $\omega_P \cdot T_{\text{syn}} = \omega_E \cdot T_{\text{syn}} - 2\pi$ und schließlich

$$\frac{2\pi}{T_{\text{sid}}} \cdot T_{\text{syn}} = \frac{2\pi}{T_E} \cdot T_{\text{syn}} - 2\pi \text{ ergibt.}$$

Nach Division durch $(2\pi \cdot T_{\text{syn}})$ folgt die oben genannte Beziehung.

Wesentlich bei der Herleitung der Formel ist die Veranschaulichung der Bewegungen von Erde und Planet, die z. B. auf dem Tageslichtprojektor mit zwei Spielzeugfiguren und einer Folie gemäß der vorherigen Zeichnung einfach durchführbar ist. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung einer Software für dynamische Geometrie ([CD Zusatzmaterial](#), Beispiel `siderisch_synodisch.ggb`).



Zu den Entfernungsverhältnissen und zur Astronomischen Einheit

Die Bestimmung von Entfernungen in unserem Sonnensystem sowie die Angabe einer grundlegenden Einheit gehört zu den ältesten Problemen in der Astronomie und ist von fundamentaler Bedeutung. Relative Entfernungsverhältnisse können über das 3. Keplersche Gesetz mit großer Genauigkeit angegeben werden. Für die Umrechnung in absolute Entfernungen muss jedoch eine der Entfernungen als Absolutwert sehr genau bekannt sein.

Im Rahmen des Unterrichts ist es nach wie vor sinnvoll, die mittlere Entfernung Erde – Sonne als Normgröße zu verwenden. Sie stimmt in sehr guter Näherung mit der Astronomischen Einheit überein.

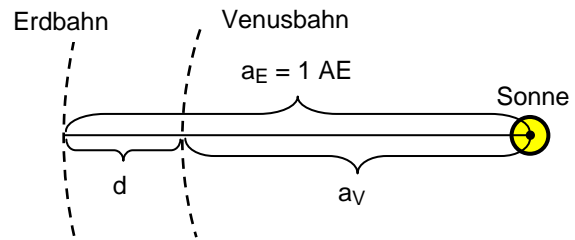
Eine sehr genaue und für Schülerinnen und Schüler gut nachvollziehbare Bestimmungsmethode der Entfernung Erde – Sonne beruht auf der Verwendung von Radar-Echos, zum Beispiel zwischen Erde und Venus.

Aus der Laufzeit $t = 276,3$ s eines derartigen Signals ergibt sich die kürzeste Entfernung zwischen den beiden Planeten zu $d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t$.

Aus dem 3. Keplerschen Gesetz folgt

$$a_V^3 \cdot T_E^2 = T_V^2 \cdot a_E^3 \quad \text{bzw.} \quad (a_E - d)^3 \cdot T_E^2 = T_V^2 \cdot a_E^3,$$

woraus man $a_E - d = \sqrt[3]{\left(\frac{T_V}{T_E}\right)^2} \cdot a_E$ und schließlich $a_E = \frac{d}{1 - 0,723}$ erhält.



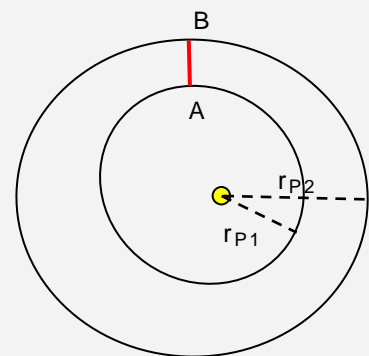
Bei der praktischen Durchführung ergeben sich Schwierigkeiten durch eine starke Verzerrung der reflektierten Signale. Trotzdem gestattet die Methode eine hohe Genauigkeit. In der Literatur findet man für die mittlere Entfernung Erde – Sonne den Wert 149 597 870 km, die Unsicherheit beträgt etwa fünf Kilometer.

Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass die Astronomische Einheit wohl nicht konstant ist, sondern sich pro Jahrhundert um etwa 10 Meter vergrößert (Krasinsky, Brumberg 2004). Eine Erklärung hierfür konnte bislang nicht gegeben werden.

Ergänzungen

- Die direkte Messung der Entfernung Erde – Sonne mit Radarsignalen versagt, da diese an der Sonne nicht reflektiert werden.
- Die absoluten Entfernungen im Sonnensystem konnten erstmals im Rahmen der Venustransits in den Jahren 1761 und 1769 ermittelt werden. Beobachtet man bei einem Venustransit – die Venus zieht dabei vor der Sonnenscheibe vorüber – von weit entfernten Standpunkten auf der Erde, so lässt sich aus der dabei messbaren Parallaxe die große Halbachse der Erdbahn berechnen. Die Genauigkeit dieser Methode – sie geht auf Edmond Halley zurück – ist allerdings nicht sehr groß.
- Die Internationale Astronomische Union hat 1976 die folgende Definition der Astronomischen Einheit beschlossen: Die Astronomische Einheit ist gleich dem Radius der kreisförmigen Umlaufbahn, auf der ein hypothetischer masseloser Körper die Sonne ohne Störung in exakt einem siderischen Jahr (365,2568983... Tage) umrundet.
- Die Minimaldistanz zweier Planeten kann *nicht* aus der Differenz der Periheldistanz des äußeren Planeten und der Apheldistanz des inneren Planeten oder gar aus der Differenz der beiden Periheldistanzen berechnet werden, weil die Bahnen nie exakt in einer Ebene liegen und die Achsen der Bahnen gegeneinander „verdreht“ sind.

Die Skizze zeigt zwei in der selben Ebene liegende Bahnen, zu denen nur die jeweilige Periheldistanzen r_{P1} bzw. r_{P2} eingetragen sind sowie die Strecke [AB], in der die Bahnen ihren Minimalabstand haben. Die beiden Planeten befinden sich im allgemeinen auch bei einer nahen Begegnung nur ungefähr in den Punkten A bzw. B, d. h. die eingezeichnete Minimaldistanz wird nur äußerst selten (unter Umständen nie) erreicht.



Quellen:

Hahn, „Unser Sonnensystem“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2004

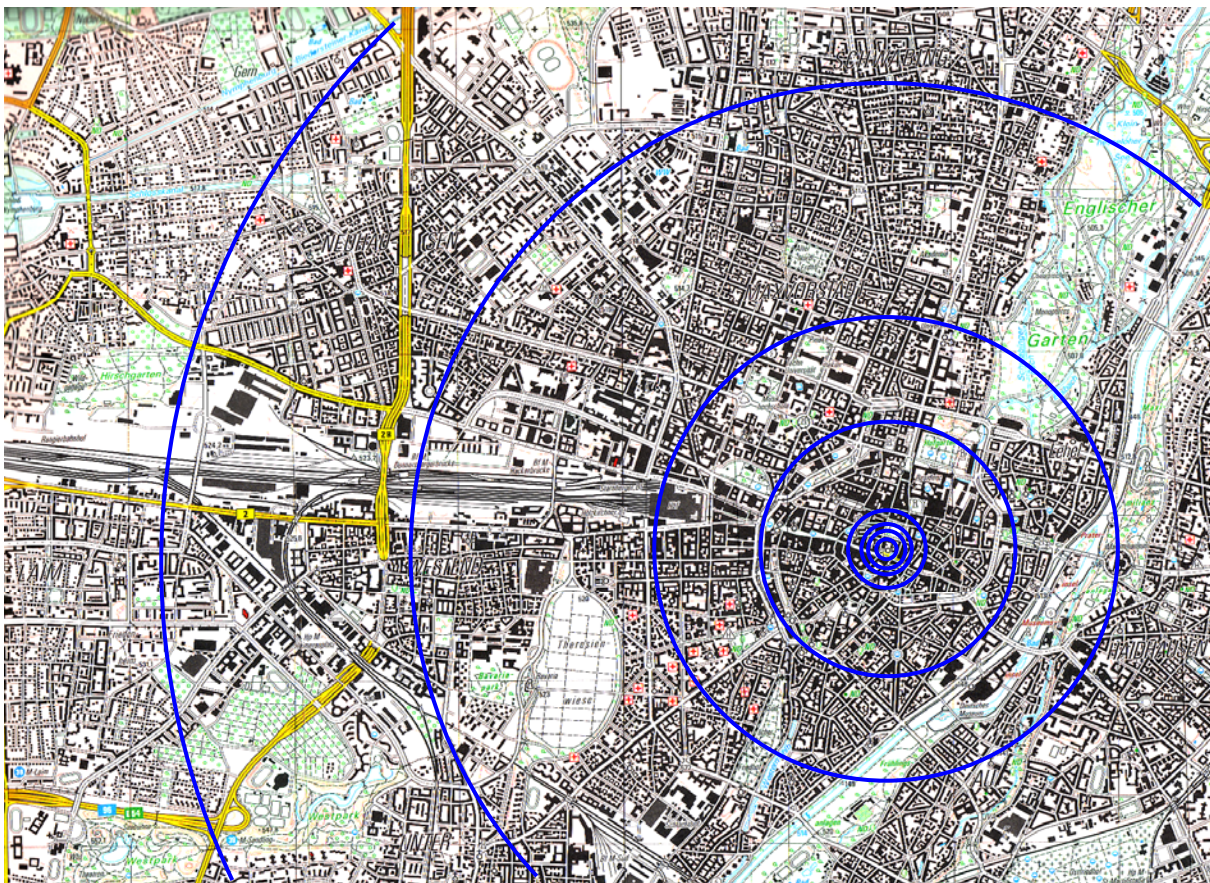
Krauter u. a., „Meyers Handbuch Weltall“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich 1994

Preuss, Dittus, Lämmerzahl, „Überraschungen vor der Haustür“, Sterne und Weltraum April 2007, S. 26 ff.

Keinesfalls versäumen sollte man, die Entfernungs- und Größenverhältnisse im Planetensystem maßstabsgerecht und eindrucksvoll zu veranschaulichen, z. B. durch Übertragung auf den Heimatstadtplan.

Modell des Sonnensystems im Maßstab 1:10⁹, dargestellt auf einem Teil eines Stadtplans von München:

	Bahnradius	Durchmesser	
Sonne	---	1,40 m	Ort: Mariensäule am Marienplatz
Merkur	58 m	5 mm	
Venus	108 m	12 mm	
Erde	150 m	13 mm	Etwa die Größe einer Murmel
Mars	227 m	7 mm	
Jupiter	778 m	140 mm	
Saturn	1,43 km	120 mm	
Uranus	2,87 km	47 mm	
Neptun	4,50 km	45 mm	



Kartengrundlage: Topographische Karte 1: 25 000, Blatt 7835 .

Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung des Landesamts für Vermessung und Geoinformation, Bayern, Nr. 6627/ 07

Der Stern α Centauri würde bei gleichem Maßstab etwa 40 000 km von der Münchner Mariensäule entfernt liegen.

Massenbestimmung und Massenverteilung im Sonnensystem

Immer dann, wenn ein Körper K (Masse m) einen Zentralkörper Z (Masse M) auf einer praktisch kreisförmigen Bahn umrundet, lässt sich die Masse des Zentralkörpers aus dem Ansatz „Gravitationskraft gleich Zentripetalkraft“ einfach berechnen.

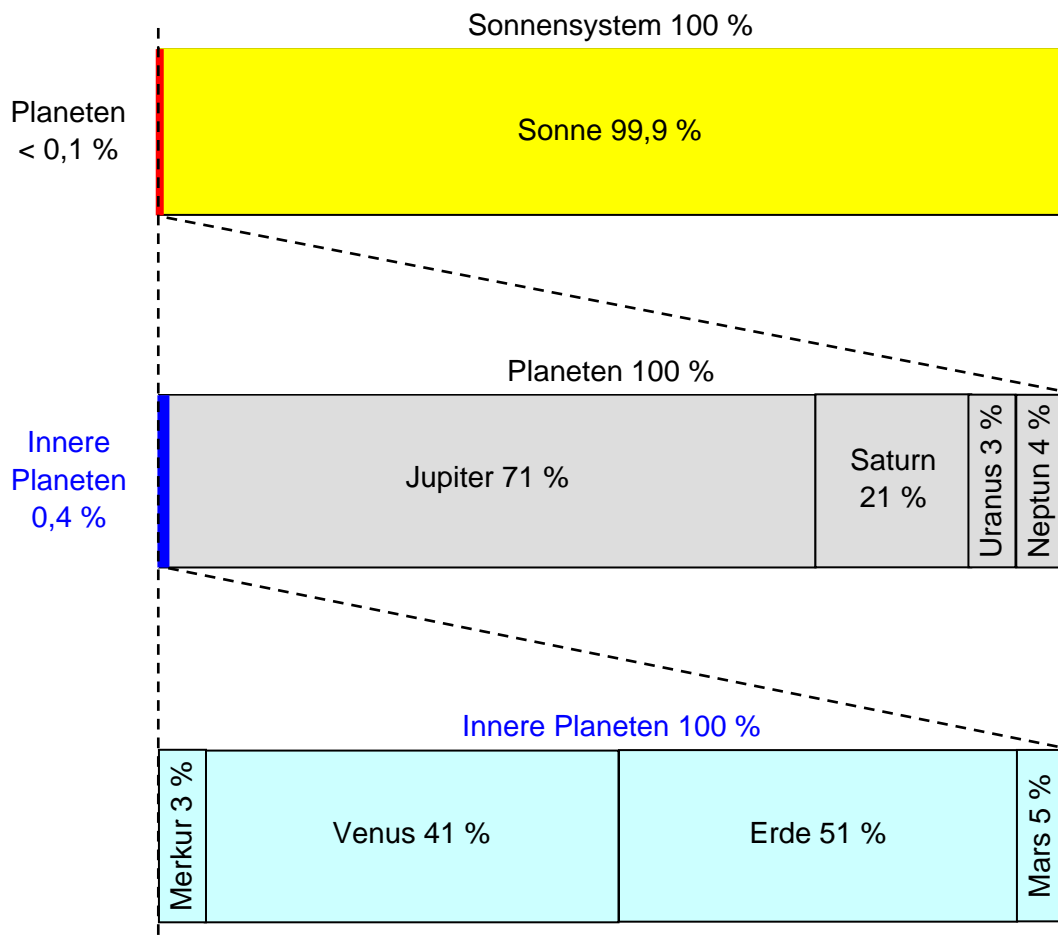
Unter der Voraussetzung $m \ll M$ folgt:

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r \quad \text{und hieraus wiederum} \quad M = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{T^2}.$$

So ergibt sich zum Beispiel aus den Bahndaten der Erde die Masse der Sonne zu

$$m_{\text{Sonne}} = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{(1\text{AE})^3}{(1\text{a})^2} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}.$$

Zur eindrucksvollen Veranschaulichung der Massenverteilung im Sonnensystem ist die folgende Darstellung geeignet.



Ergänzung

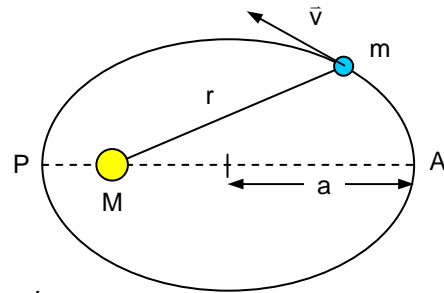
Die Masse des mondlosen Planeten Merkur konnte dadurch genau bestimmt werden, dass man beim Vorbeiflug der Sonde Mariner 10 deren Bahn verfolgt und ausgewertet hat.

Quelle:

Krauter u. a., „Meyers Handbuch Weltall“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich 1994

Energie und Bahngeschwindigkeit auf Ellipsenbahnen

Ein Körper der Masse m läuft auf einer Ellipsenbahn um den Zentralkörper der Masse M um. Setzt man dieses System als abgeschlossen voraus, so ist die Gesamtenergie konstant, die Anteile an potentieller und an kinetischer Energie verändern sich jedoch mit der momentanen Entfernung r .



Die Gesamtenergie hängt außer von den Massen der beiden Körper von der großen Halbachse der Ellipsenbahn ab.

Ergänzung

Unter der Voraussetzung $m \ll M$ ist $E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = -\frac{GMm}{r} + \frac{m}{2}v^2$.

Speziell im Aphel gilt: $E_{\text{ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \frac{m}{2}v_A^2$ (1)

und im Perihel: $E_{\text{ges}} = -\frac{GMm}{r_P} + \frac{m}{2}v_P^2$ (2).

$v_A = v_P \cdot \frac{r_P}{r_A}$ (Konsequenz aus dem 2. Keplerschen Gesetz) in (1) eingesetzt führt auf

$E_{\text{ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \frac{m}{2}v_P^2 \cdot \frac{r_P^2}{r_A^2}$, und mit Hilfe von (2) erhält man

$$E_{\text{kin,P}}$$

$$E_{\text{ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \left(E_{\text{ges}} + \frac{GMm}{r_P} \right) \cdot \frac{r_P^2}{r_A^2}$$

Multiplizieren mit r_A^2 und Umstellen der Gleichung ergibt

$E_{\text{ges}} \cdot (r_A^2 - r_P^2) = -GMm \cdot (r_A - r_P)$, woraus schließlich

$E_{\text{ges}} = -\frac{GMm}{r_A + r_P} = -\frac{GMm}{2a}$ folgt.

Aus dem Energiesatz in der Form $\frac{m}{2}v^2 - \frac{GmM}{r} = -\frac{GmM}{2a}$ folgt sehr einfach die für

den Unterricht sehr hilfreiche Beziehung $v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$.

Mit ihr lässt sich für jeden beliebigen Bahnpunkt mit der Entfernung r vom Massezentrum die zugehörige Bahngeschwindigkeit v für Bahnen mit minimalem Energieaufwand ermitteln. Diese Bahnen sind die sogenannten Hohmannbahnen.

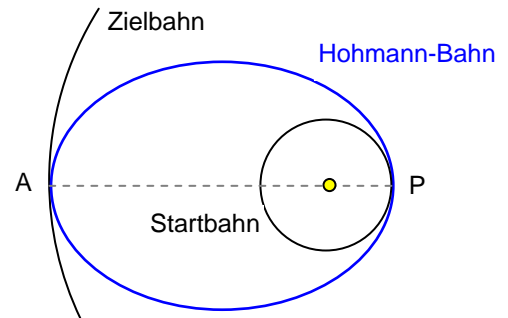
Spezialfälle: a) $a = r$, Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn $v_K = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ (konstant),

b) $a \rightarrow \infty$, Fluchtgeschwindigkeit $v_F = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$.

Die Bahnen künstlicher Satelliten

Es gibt eine Vielzahl von Bahnformen, die sich wesentlich durch die Flugzeit und die zum Erreichen der Bahn und des Ziels benötigte Energie unterscheiden.

Die Hohmann-Bahnen, sind zwar mit besonders geringem Energieaufwand verbunden, führen dafür aber auch zu relativ langen Flugzeiten.

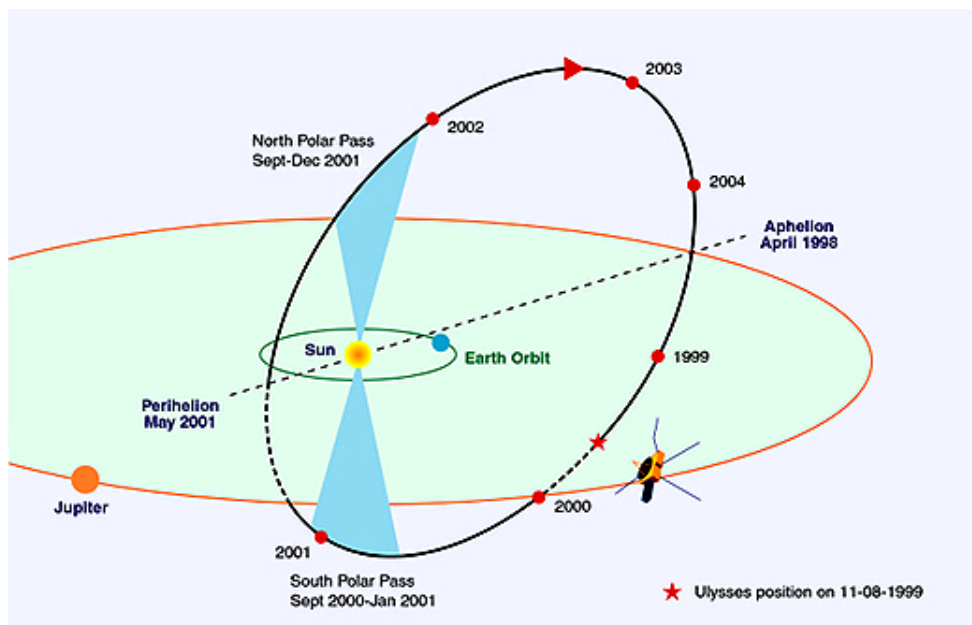


Ergänzung

Für weiterführende Informationen wird der Artikel von Donald Wiss, „Bahnen niedriger Energie“, Sterne und Weltraum September 2004 empfohlen (online abrufbar unter www.wissenschaft-schulen.de).

In diesem Artikel wird auch von Bahnformen berichtet, die sich energetisch als deutlich günstiger erweisen als Hohmann-Bahnen. Diese oft sehr weitläufigen und verschlungenen Bahnformen ergeben sich unter bestimmten Vorbedingungen aus aufwändigen Computerberechnungen zum Mehrkörperproblem. Sie bedingen aber sehr lange Flugzeiten und kommen deshalb für bemannte Missionen nicht in Frage.

Besonders hohe Energien werden für Bahnen benötigt, die unter großem Winkel gegen die Ekliptik, also „schräg in den Raum hinaus“ verlaufen, so zum Beispiel bei der Ulysses-Mission.



Bildquelle: NASA

Ergänzung

Gegenüber erdumkreisenden Satelliten ist bei Raumsonden der große Erdbestand und die damit verbundene lange Laufzeit der Steuersignale ein deutliches Problem. Deshalb müssen Raumsonden über eigenständige Computersysteme verfügen, die sie in gewissem Umfang von den Bodenstationen unabhängig machen.

Die Navigation genügt höchsten Ansprüchen. So ist es möglich, Positionen mit Hilfe des Dopplereffekts und von Signallaufzeiten mit einer Genauigkeit von unter einem Meter zu bestimmen. Die Entfernung zur Erde spielt dabei keine Rolle.

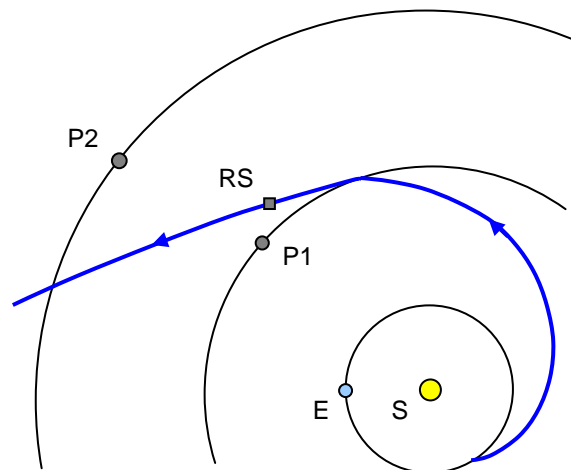
Für die Energieversorgung verwendet man bei Raumsonden zum Mond und zu den inneren Planeten meist Solarzellen, die über Akkumulatoren gepuffert sind. Da Solarzellen mit wachsendem Abstand von der Sonne immer weniger Leistung liefern, kommen für den Flug zu den äußeren Planeten Isotopenbatterien zum Einsatz.

Quelle: Wikipedia, Portal Astronomie, Raumsonden

Die Swing-by-Technik

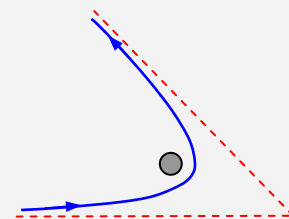
In der Regel wird bei Weltraumflügen versucht, eine Raumsonde an mehreren Planeten vorbeifliegen zu lassen. Dazu sind mehrere Richtungsänderungen erforderlich. Diese Änderungen können durch geeignete Impulse des Steuersystems bewirkt werden. Weil das einerseits einen zusätzlichen Treibstoffverbrauch bedeutet und Treibstoff andererseits nicht in beliebigen Mengen mitgeführt werden kann, sind diesem Verfahren Grenzen gesetzt.

Einen Ausweg bietet die unter dem Namen „Swing-by“ (auch „Fly-by“) bekannte Technik der Gravitationsumlenkung. Dabei wird eine Raumsonde durch das Gravitationsfeld des Planeten, an dem sie vorbeifliegt, gezielt auf eine andere Bahn gebracht und gewinnt dabei kinetische Energie. Diese Energie gibt der Planet zwar ab, seine kinetische Energie ändert sich dadurch aber nur unmerklich. Das Verfahren kann als elastischer Stoß zwischen Sonde und Planet aufgefasst werden.



Ergänzung

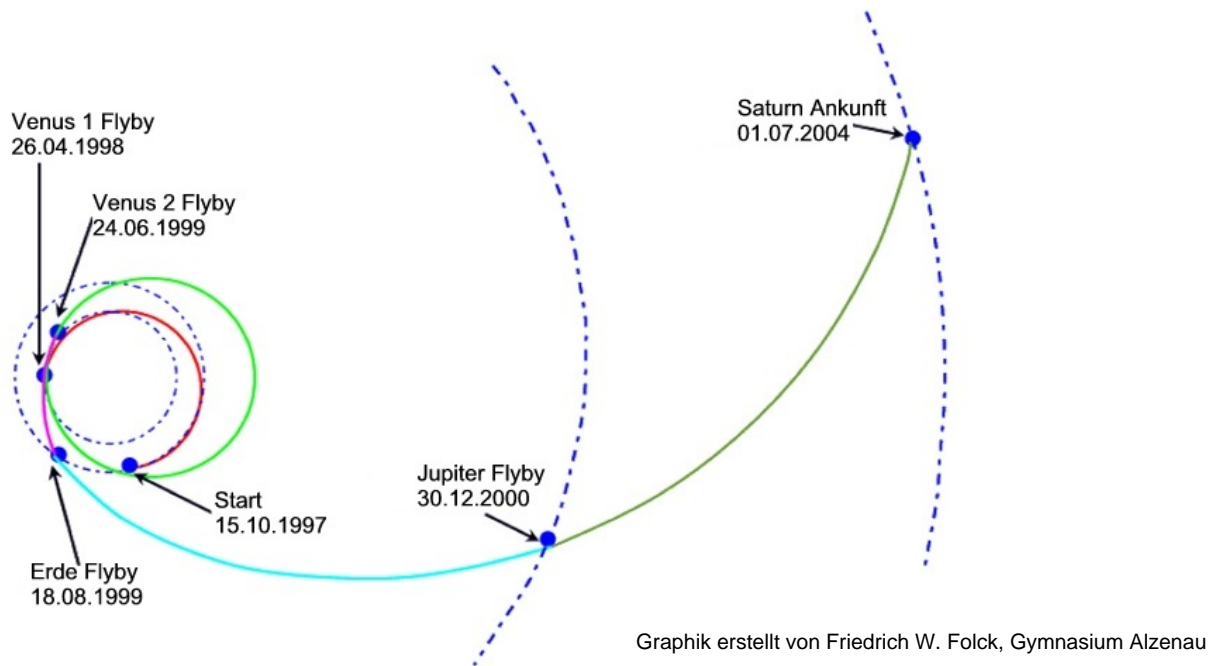
Interessant ist, dass sich die Sonde (in Bezug auf die ruhende Sonne) zunächst seitlich „vor“ dem Planet bewegt, allerdings langsamer. Sie wird dann vom Planet überholt und „hinter ihm“ umgelenkt, wobei sie die entsprechende Beschleunigung erfährt. Vom Planet aus gesehen kommt die Sonde auf ihn zu, bewegt sich seitlich an ihm vorbei, umrundet ihn auf seiner Rückseite und bewegt sich dann wieder von ihm weg. Die Bewegung erfolgt in diesem Bezugssystem auf einer Hyperbelbahn.



Donald Wiss zieht in seinem Artikel „Swing-by-Manöver – Was steckt dahinter?“ (Sterne und Weltraum, Dezember 2003, S. 23 ff.) einen anschaulichen Vergleich: Ein Tennisball wird mit dem Schläger „aus der Hand“ geschlagen. Man betrachte diesen Vorgang einerseits als Zuschauer von außen und andererseits über eine am Schlägerkopf befestigte Kamera. Die Gravitationskraft des Planeten entspricht in diesem Modell der elastischen Kraft durch die Besaitung.

Erstmals angewandt wurde das Verfahren bei der Sonde Mariner 10. Diese startete am 3. November 1973 und wurde am 5. Februar 1974 durch einen Swing-By an der Venus zum Merkur weitergeleitet. An diesem Beispiel können auch die Ansprüche an die Zielgenauigkeit sehr schön verdeutlicht werden: Der Fehler beim Vorbeiflug an der Venus durfte maximal 300 km betragen. Tatsächlich waren es jedoch nur 20 km. Ein Schütze hätte bei gleicher Präzision ein 20-Cent-Stück über eine Entfernung von 250 km treffen müssen.

Ein weiteres Beispiel ist die Raumsonde „Cassini-Huygens“, deren Flugbahn in der folgenden Graphik dargestellt ist.



Eigenschaften der Planeten im Vergleich

Ein detailliertes Eingehen auf jeden der acht Planeten ist aus Zeitgründen sicher nicht möglich, es birgt außerdem die Gefahr der Langatmigkeit. Ein zügiges Aufzeigen von charakteristischen Merkmalen und Besonderheiten einzelner Planeten ist jedoch zum Beispiel unter Verwendung der beiden folgenden Vergleichstabellen gut möglich.

Hier bietet sich auch eine Gelegenheit für eigenständiges Arbeiten der Schülerinnen und Schüler. Man gibt ihnen die beiden Tabellen leer vor. Unter Verwendung geeigneter Materialien erarbeiten sie dann ggf. arbeitsteilig die Einträge. Alternativ dazu ist die Vergabe von Kurzreferaten denkbar.

Die inneren Planeten

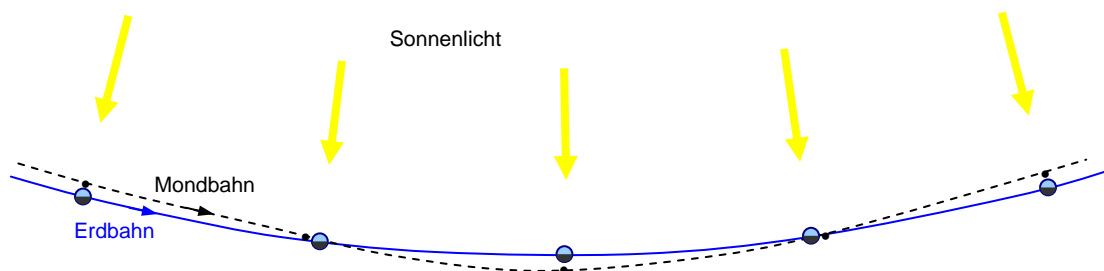
	Merkur	Venus	Erde	Mars
Mittlere Entfernung zur Sonne	0,387 AE	0,723 AE	1 AE	1,52 AE
Numerische Exzentrizität der Bahn	0,206	0,007	0,017	0,093
Umlaufdauer	88 d	224,7 d	365,25 d	687 d
Mittlere Umlaufgeschwindigkeit	47 km/s	35 km/s	30 km/s	24 km/s
Neigung Bahnebene – Ekliptik	7,0°	3,4°	0°	1,9°
Neigung Äquatorebene – Bahnebene	0°	177° 18'	23° 27'	25° 11'
Äquatordurchmesser	4878 km	12102 km	12756 km	6787 km
Rotationsdauer	58 d 16 h	243 d 0h 14m	23 h 56 m 4 s	24h 37m 32s
Tag-Nacht-Zyklus	≈ 176 d	≈ 117 d	≈ 24 h	≈ 24,5 h
Mittlere Dichte	5,43 g/cm ³	5,25 g/cm ³	5,52 g/cm ³	3,90 g/cm ³
Temperatur auf der Oberfläche bzw. in den Atmosphärenschichten	Ca. -170° C bis 430° C	Ca. 470° C	22° C	Ca. -140° C bis 20° C
Atmosphäre	---	hauptsächlich CO ₂ , hoher Druck	N ₂ und O ₂	hauptsächlich CO ₂ , geringer Druck
Zahl der derzeit bekannten Monde (Stand 2007)	---	---	1	2
Bemerkenswertes:	heißer, unwirtlicher Planet, Oberfläche mondähnlich, wüstenartig, 1 Merkurtag dauert knapp 2 Merkurjahre	Rotation retrograd, hellster Planet, reflektiert 80 % des Sonnenlichts, starker Treibhauseffekt, lebensfeindlich	einzigster der inneren Planeten mit großem Mond, einziger Planet mit dauerhaft flüssigem Wasser	erdähnlichster Planet, Jahreszeiten, eisbedeckte Polregionen, früher vermutlich flüssiges Wasser

Im Zusammenhang mit dem Erdmond sollten folgende Sachverhalte kurz angesprochen werden:

- Von der Erde aus gesehen haben Sonne und Mond etwa den gleichen Winkeldurchmesser von $0,5^\circ$.
- Bei der Bewegung des Mondes um die Erde handelt es sich um eine *gebundene Rotation*, das heißt die Rotationsdauer des Mondes ist gleich seiner Umlaufdauer um die Erde. Der Mond kehrt uns deshalb immer die gleiche Seite zu.
- Unter Verwendung des Gravitationsgesetzes lässt sich das Verhältnis der Kräfte F_S und F_E von der Sonne bzw. der Erde auf den Mond einfach abschätzen:

$$\frac{F_S}{F_E} = \frac{m_S \cdot r_{E-M}^2}{m_E \cdot r_{S-E}^2} \approx 2.$$

Dies untermauert die interessante Tatsache, dass die Bahn des Mondes im heliozentrischen Bezugssystem nicht etwa eine Rosettenform beschreibt, sondern stets konkav zur Sonne verläuft (siehe folgende Graphik).



Die äußeren Planeten

	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
Mittlere Entfernung zur Sonne	5,20 AE	9,54 AE	19,2 AE	30,1 AE
Numerische Exzentrizität der Bahn	0,048	0,056	0,047	0,009
Umlaufdauer	11,86 a	29,5 a	84,0 a	164,8 a
Mittlere Umlaufgeschwindigkeit	13 km/s	9,6 km/s	6,8 km/s	5,4 km/s
Neigung Bahnebene – Ekliptik	1,3°	2,5°	0,8°	1,8°
Neigung Äquatorebene–Bahnebene	3° 4'	26° 0' 44'	97° 55'	28° 48'
Äquatordurchmesser	142796 km	120000 km	50800 km	49500 km
Rotationsdauer	9 h 50 m 30 s	10h 13m 23s	17 h 12 m	16 h 6 m
Tag-Nacht-Zyklus	≈ 10 h	≈ 10h	≈ 17 h	≈ 16 h
Mittlere Dichte	1,3 g/cm ³	0,69 g/cm ³	1,29 g/cm ³	1,64 g/cm ³
Temperatur auf der Oberfläche bzw. in den Atmosphärenschichten	Ca. –140 °C bis 20 °C	Ca. –189 °C bis –139 °C	Ca. –210 °C	Ca. –193 °C bis –153 °C
Atmosphäre	hauptsächlich H ₂ und He	hauptsächlich H ₂	hauptsächlich H ₂ und He	hauptsächlich H ₂ und He
Zahl der derzeit bekannten Monde (Stand 2007)	61 sowie Ringsystem	31 sowie Ringsystem	21 sowie Ringsystem	11 sowie Ringsystem
Bemerkenswertes:	zweithellster Planet, großer roter Fleck, Vulkanismus auf dem Mond Io, Mond Europa eisbedeckt	Mond Titan hat als einziger Mond eine dichte Atmosphäre		dynamische Atmosphäre mit Wolkenstrukturen

Quellen und weiterführende Literatur:

Gondolatsch, Steinacker, Zimmermann, „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990

Hahn, „Unser Sonnensystem“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2004

Lang, „Das Sonnensystem“, Elsevier, München 2007

Weigert, Wendker, Wisotzki „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005

Ergänzungen

- Die gebundene Rotation ist vermutlich die Folge einer Gezeitenreibung in einem Stadium, in dem die Oberfläche des Mondes noch nicht erkaltet war.
- Zu den Atmosphären: Ein Planet oder Mond kann eine Atmosphäre dauerhaft nur halten, wenn die Geschwindigkeit der Gasteilchen aufgrund ihrer thermischen Bewegung kleiner als die Fluchtgeschwindigkeit des Körpers ist. Eine Atmosphäre ist deshalb um so wahrscheinlicher und stabiler, je massereicher der Planet und je niedriger seine Oberflächentemperatur ist.

Zwergplaneten

Derzeit (November 2008) sind fünf Objekte des Sonnensystems als Zwergplaneten deklariert. Auch hier macht eine tabellarische Übersicht einen raschen Vergleich möglich.

	Ceres	Pluto	Eris	Haumea	Makemake
Durchmesser etwa	950 km	2350 km	2600 km	1100 – 2200 km (Ellipsoid)	1800 km
Mittlere Entfernung zur Sonne	2,8 AE	39,5 AE	67,7 AE	43,3 AE	45,7 AE
Numerische Exzentrizität der Bahn	0,08	0,25	0,44	0,19	0,16
Umlaufdauer	4,6 a	248 a	557 a	285 a	309 a
Bahnneigung gegen die Ekliptik	10,6°	17,1°	44,2°	28,2°	29,0°
Anzahl der Monde	0	3	1	2	0

Asteroiden

Asteroiden sind kleinere, meist unregelmäßig geformte Gesteinsbrocken, die sich auf Keplerbahnen um die Sonne bewegen. Die meisten von ihnen befinden sich im Asteroidengürtel in einer Entfernung von etwa 2,0 AE bis 3,4 AE. Sie zählen zusammen mit den Kometen und Meteoriten zu den Kleinkörpern. Über 200 000 dieser Objekte sind klassifiziert.

Kometen

Es werden unterschieden:

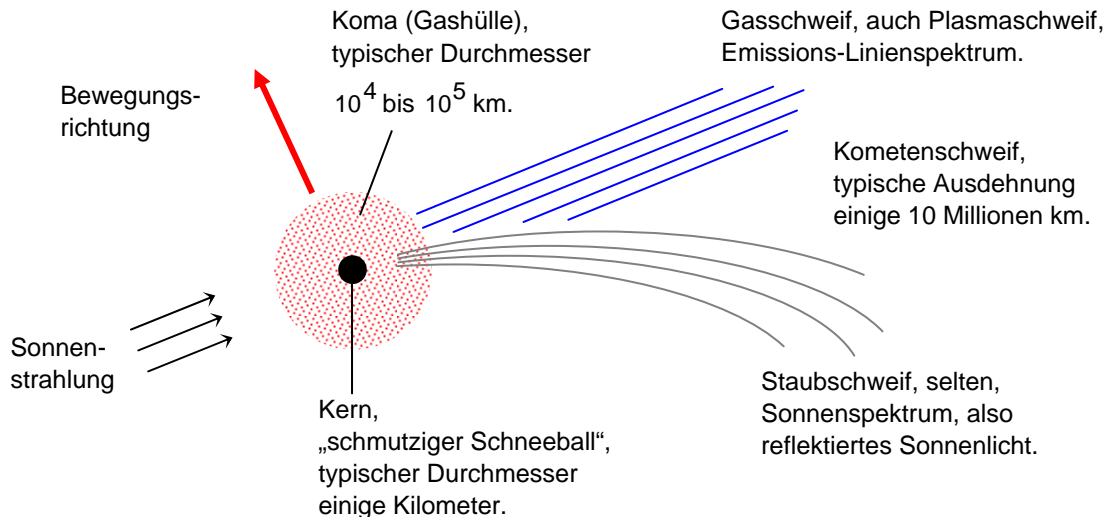
- Kurzperiodische Kometen mit Umlaufdauern kleiner als 200 Jahre.
Sie stammen wahrscheinlich aus dem Kuipergürtel, die Bahnneigungen (Beträge) übersteigen 20° meist nicht.
- Langperiodische Kometen mit Umlaufdauern bis zu $8 \cdot 10^6$ Jahre.
Ihr Ursprung wird in der Oortschen Wolke vermutet, die Bahnneigungen sind statistisch verteilt, ihr Umlaufsinn entspricht teilweise dem der Planeten, kann aber auch retrograd sein. Langperiodische Kometen können durch Gravitationskräfte zum Beispiel bei einem nahen Vorübergang an Jupiter zu einem kurzperiodische Kometen umgewandelt werden.

Beispiele:

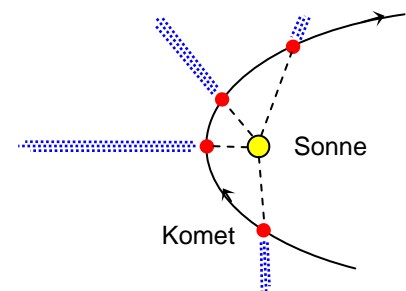
	Halley	Encke	Hyakutake	Hale-Bopp	McNaught
Typ	kurzperiodisch	kurzperiodisch	langperiodisch	langperiodisch	aperiodisch
Numerische Exzentrizität	0,967	0,847	0,999	0,995	---
Große Halbachse	17,8 AE	2,22 AE	ca. 2350 AE	186 AE	---
Periheldistanz	0,586 AE	0,339 AE	0,230 AE	0,914 AE	0,171 AE
Apheldistanz	35,1 AE	4,097 AE	ca. 4700 AE	371,5 AE	---
Siderische Umlaufdauer	76a 37d	3a 10d	ca. $1,14 \cdot 10^5$ a	ca. 2540a	---
Neigung der Bahnebene	ca. 162°	ca. 12°	ca. 125°	ca. 89°	ca. 78°
Bemerkungen	bekannt seit 240 v. Chr.; erster Komet, der als periodisch nachgewiesen wurde (Halley)	kürzeste Umlaufzeit aller bekannten Kometen	war teilweise nicht beobachtbar	war teilweise nicht beobachtbar	Das Perihel der Hyperbelbahn wurde am 12.01.2007 durchlaufen.

Anmerkung: Die sichere Einstufung eines Kometen als langperiodisch oder aperiodisch ist problematisch. Wegen des verhältnismäßig geringen Beobachtungszeitraums liegen oft zu wenige Bahndaten für eine sichere Unterscheidung vor.

Der Aufbau eines Kometen



In entsprechender Nähe zur Sonne sublimieren infolge der Erwärmung an der Kernoberfläche die leichtflüchtigen Substanzen und geben auch Staubanteile frei, wodurch die Koma des Kometen entsteht. Ab einer Mindestentfernung von etwa 1,5 AE formt der Sonnenwind daraus den stets von der Sonne abgewandten Schweif, indem er Materie aus der Koma mitreißt. Da die Staubteilchen dabei nur verhältnismäßig kleine Geschwindigkeiten erreichen, ist der Staubschweif in Bezug auf die Bewegungsrichtung des Kometen nach hinten gekrümmt.



Ergänzungen

- Die europäische Raumsonde GIOTTO konnte im Frühjahr 1986 bei einem Vorbeiflug am Komet Halley in etwa 600 km Entfernung viele Messdaten sowie Bilder von dessen Kern liefern. Die Auswertungen haben unter anderem gezeigt, dass der Kern von einer dunklen Kruste umgeben ist, deren Reflexionsvermögen mit 4 % unter dem von Asphalt liegt. Der Kern erwärmt sich deshalb in Sonnennähe auf etwa 70°C .
- Beim Periheldurchgang wird der Ausstoß an Gas und Staub pro Sekunde grob auf 30 bis 40 Tonnen geschätzt. Mit diesen großen Mengen an abgegebenem Gas und Staub liefern Kometen jene Partikel, die zumindest teilweise als Ursache von Meteoritenschwärmen angesehen werden (sehr schön zu beobachten ist Mitte August der Perseidenschwarm). Insbesondere sind Kometen, die sich öfter in Sonnennähe aufhalten, keine dauerhaften Gebilde, sie lösen sich mit der Zeit auf.

Quellen: Keller, „Astrowissen“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003
Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995
Wikipedia, Astronomie-Portal, Komet

Meteorite

Wenn ein interplanetarer Kleinkörper mit einer Größe von etwa 10^{-2} mm bis zu 1 m auf seinem Weg durch das Sonnensystem in die Erdatmosphäre eindringt, führt dies zu jener Leuchterscheinung, die im Volksmund als „Sternschnuppe“ und in der Astronomie als *Meteor* bezeichnet wird. Der Kleinkörper, der die Leuchterscheinung verursacht, wird hingegen *Meteorit* genannt.

Die Geschwindigkeiten kleiner Meteorite werden in Höhen von etwa 100 km durch Reibungseffekte sehr stark vermindert. Dabei kommt es einerseits längs des Flugkanals zur Anregung und Ionisierung von Molekülen der Atmosphäre und des verdampften Meteoritenmaterials. Wie spektroskopische Untersuchungen gezeigt haben, ist die typische Leuchterscheinung im Wesentlichen darauf zurückzuführen. Andererseits bewirken die Reibungseffekte eine heftige Erhitzung, wodurch diese kleinen Meteorite sehr rasch verglühen.

Objekte mit Durchmessern von 0,1 μm bis 10 μm werden als Mikrometeorite bezeichnet. Sie verglühen nicht, sondern sinken in der Atmosphäre langsam zu Boden. Relativ unsichere Schätzungen gehen davon aus, dass täglich etwa 1 000 Tonnen dieses Materials auf die Erde niedersinken.

Größere Meteorite von einigen Zentimetern Durchmesser und mehr verdampfen nicht ohne weiteres. Bei ihnen kommt zwar die Oberfläche zum Glühen, das Innere bleibt jedoch kühl. Dadurch entstehen hohe Spannungen, aufgrund derer manche von ihnen in Bruchstücke zerplatzen.

Große Meteoritenstücke durchdringen die Atmosphäre vollständig und erreichen den Erdboden. Fundstücke weisen Massen im Bereich von 100 g bis mehrere Kilogramm auf. Es gibt aber auch ausgesprochen seltene Meteoritenfunde mit etlichen Tonnen Masse. Der Masse entsprechend bilden solche Meteorite beim Auftreffen mehr oder weniger große Einschlagkrater.

Meteorite zeigen Unterschiede in ihrer chemischen Zusammensetzung. Die beiden Hauptgruppen sind die *Eisen-* und die *Steinmeteorite*. Bei den Steinmeteoriten, die etwa 90 % aller Meteorite ausmachen, handelt es sich um Restmaterial von Kometen. Eisenmeteorite stammen dagegen vermutlich aus Kollisionen von Asteroiden.

Regelmäßig sind jedes Jahr zu bestimmten Zeiten sogenannte *Meteorströme* zu beobachten. Sie entstehen immer dann, wenn die Erde Kometenbahnen kreuzt, in denen sich Restmaterial von Kometen befindet.

Ergänzungen

- Häufig wird die Bezeichnung Meteorit nur für Objekte verwendet, die tatsächlich die Erdoberfläche erreichen. Die anderen interplanetarischen Kleinkörper werden *Meteoride* genannt.
- Meteorite in der Größe eines Tennisballs erzeugen Meteore von der Helligkeit des Vollmondes. Man spricht dann von einer *Feuerkugel* oder einem *Boliden*. Diese Erscheinung ist ausgesprochen selten.
- Die Meteorströme werden nach dem Sternbild bezeichnet, von dem sie aufgrund eines perspektivischen Effekt scheinbar ausgehen. Am bekanntesten sind die Perseiden und die Leoniden.

Quellen und weiterführende Literatur:

Gondolatsch, Steinacker, Zimmermann, „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990
Hahn, „Unser Sonnensystem“, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2004
Keller, „Astrowissen“, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2003
Lermer, „Grundkurs Astronomie, Bayerischer Schulbuchverlag, München 1989

1.3 Die Sonne

Charakteristische Daten der Sonne

Die Sonne hat für uns Menschen in mehrfacher Hinsicht eine herausragende Bedeutung. Infolge der verhältnismäßig geringen Entfernung zur Erde ist sie für Astrophysiker der einzige Stern, auf dessen Oberfläche Vorgänge und Strukturen direkt beobachtet werden können. Aufgrund der ähnlichen physikalischen Eigenschaften lassen sich Erkenntnisse über die Sonne auf die anderen Fixsterne übertragen.

Zunächst sollen grundlegende Daten der Sonne bereitgestellt werden:

Masse	$M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ (bzw. $10^{33,3} \text{ g}$ als Merkhilfe)
Radius	$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$
Mittlere Dichte	$\rho_{\odot} = 1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Diese Tabelle wird im Verlauf des Unterrichts durch die Werte für die Oberflächentemperatur, die Leuchtkraft sowie die scheinbare und die absolute Helligkeit der Sonne ergänzt.

Zum Sonnendurchmesser

Der Sonnendurchmesser lässt sich im Rahmen einer Sonnenbeobachtung (möglichst mittags, geringere Refraktion) aus der Erdrotation abschätzen. Im stillstehenden Fernrohr dauert es bei direkter Beobachtung mit Filter bzw. bei Projektion etwa 2 Minuten, bis die Sonne sich um ihren eigenen Durchmesser weiterbewegt hat.

Aus $\frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{2 \text{ min}}{24 \cdot 60 \text{ min}}$ ergibt sich für die Sonne ein Winkeldurchmesser von $\alpha \approx 0,5^\circ$

und daraus ein wahrer Durchmesser von $D \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ km}$.

Natürlich ist das eine grobe Abschätzung. Sie ist außerdem nur dann korrekt, wenn sich die Sonne scheinbar am Himmelsäquator befindet. Andernfalls muss die Deklination δ der Sonne berücksichtigt werden (denn stünde sie scheinbar am Himmelsnordpol, würde sie überhaupt nicht aus dem Blickfeld des Fernrohrs hinauswandern). Die beobachtete Zeitdauer, innerhalb derer sich die Sonne um ihren eigenen Durchmesser weiterbewegt hat, ist um den Faktor $\cos \delta$ zu korrigieren. Den Wert für die Deklination entnimmt man einem Jahrbuch oder schätzt ihn aus der Überlegung ab, dass sich die Sonne maximal $23,5^\circ$ vom Himmelsäquator entfernt, und das nahezu sinusförmig mit der Zeit in Tagen.

Beispiel:

Datum: 20. November, also etwa 60 Tage nach Herbstbeginn

Deklination: $\delta = 23,5^\circ \cdot \sin(60^\circ) = 20,3^\circ$

Beobachtete Zeit: $t = 138 \text{ s}$

Scheinbarer Durchmesser: $\alpha = \frac{360^\circ}{86400} \cdot 138 \cdot \cos(20,3^\circ) = 0,54^\circ$

Wahrer Durchmesser: $D = 2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot 1 \text{ AE} = 1,41 \cdot 10^6 \text{ km}$

Die Angaben zur Oberflächentemperatur und zur Strahlungsleistung (Leuchtkraft) der Sonne legen die Frage nahe, wie man derartigen Daten erhält. Das Bewusstsein, dass diesbezüg-

lich nur die von der Sonne kommende Strahlung Informationen liefern kann, ist bei den Schülerinnen und Schülern sehr unterschiedlich ausgeprägt und daher eine Bemerkung wert.

Das Spektrum der Sonne

Über Jahrtausende orientierte man sich in der Astronomie in erster Linie an den Bewegungen der Gestirne. Um 1860 begann man, neben der Untersuchung der Helligkeit der Sterne auch, das von ihnen ausgesandte Licht physikalischen Messungen zu unterziehen: Kirchhoff und Bunsen entwickelten die Spektralanalyse. Sie konnten die fast 50 Jahre vorher entdeckten Fraunhofer-Linien als Absorptionslinien chemischer Elemente erklären und einen Zusammenhang mit den Emissionslinien nachweisen (→ Kapitel 3.2 Zeittafel zur Astronomie). Dies wird historisch häufig als der *Beginn der nichtmechanischen Astrophysik* angesehen (→ [L15]).

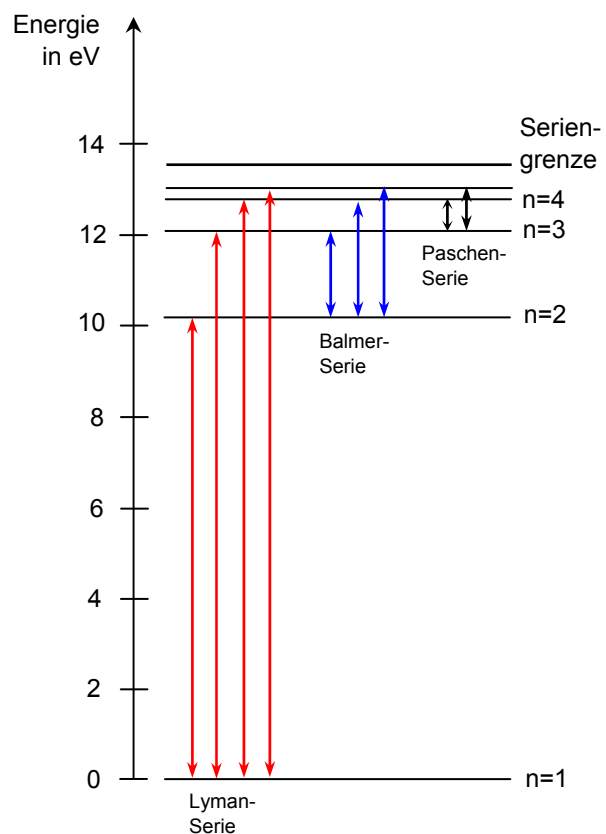
Begleitet von Bildmaterial bietet sich dieser Sachverhalt als interessanter Einstieg in das Kapitel ‚Spektrum der Sonne‘ an. Ist an der Schule ein Spektralapparat verfügbar, sollte diesem Einstieg unbedingt die direkte Beobachtung des Sonnenspektrums mit den Fraunhoferschen Linien vorangestellt werden (besonders einfach realisierbar mit einem Taschenspektroskop; Gerät nicht direkt in Richtung Sonne halten, sondern etwa im 90° -Winkel dazu; diesiges Wetter ist besonders günstig). Die Überleitung zu Spektren gestaltet sich dann völlig unkompliziert.

Die Schülerinnen und Schüler haben sich in der 9. Jahrgangsstufe mit der Erzeugung von Spektren beschäftigt, das Atom als System mit diskreten Energieniveaus kennen gelernt und den Übergang zwischen Energieniveaus durch die Emission beziehungsweise Absorption von Photonen phänomenologisch beschrieben (→ Ph 9.2).

Die erforderliche Wiederholung hierzu ist auf die für die Astrophysik wichtigen Aspekte auszulegen, zumal die entsprechenden Kenntnisse nicht nur für das Kapitel „Die Sonne“, sondern auch für alle folgenden Kapitel von grundlegender Bedeutung sind. Auch sollte die Möglichkeit, im Rahmen dieser Wiederholung experimentell zu arbeiten, keinesfalls ungenutzt bleiben. Neben dem Wasserstoffspektrum empfiehlt es sich, den Schülerinnen und Schülern auch die Beobachtung der Linienspektren von Helium und Natrium zumindest mit der sogenannten subjektiven Methode (zum Beispiel mit einem optischen Gitter) zu ermöglichen.

Nun gilt es, einen konkreten Zusammenhang zwischen den Wellenlängen der Wasserstofflinien und den zugehörigen Energieübergängen des Atoms herzustellen.

Dazu dient die Formel für die Energiewerte des Wasserstoffatoms



$$E_n = R_H hc \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) = 13,60 \text{ eV} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{mit der Hauptquantenzahl } n = 1, 2, 3, \dots$$

Am zugehörigen Energieniveauschema lassen sich einzelne Übergänge einprägsam veranschaulichen.

Nur wenn ein Atom von einem höheren Energiezustand (n_2) in einen niedrigeren Energiezustand (n_1) übergeht, wird elektromagnetische Strahlung in Form eines Quants emittiert,

dessen Energie durch $\frac{h \cdot c}{\lambda} = E_{n_2} - E_{n_1} = 13,60 \text{ eV} \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ beschrieben wird. Die

wichtige H_α -Linie von Wasserstoff entsteht durch den Übergang von $n_2 = 3$ auf $n_1 = 2$.

Beim umgekehrten Prozess wird ein Quant mit exakt passender Energie absorbiert und das Atom geht vom Grundzustand (Regelfall) in einen höheren Energiezustand über.

Zur experimentellen Veranschaulichung dieser Resonanzabsorption lässt man das Licht einer Natriumdampflampe durch eine Bunsenbrennerflamme strahlen. Werden in die Flamme NaCl-Kristalle gestreut, wirft die Flamme einen deutlichen Schatten. Dieser Schatten bleibt jedoch bei Verwendung von Glühlampenlicht aus. (→ Handreichung Atome, Wellen,



Quanten, ISB München, S. 29)

Im Zusammenhang damit sollten Hinweise zur Ionisationsgrenze von Wasserstoff, zur Serienformel von Balmer (1885 von ihm als 60-Jährigem gefunden) und zu den Spektralbereichen der einzelnen Serien erfolgen. Auch eine kurze Erläuterung zur Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in die Erdatmosphäre lässt sich an dieser Stelle gut anbringen.

Zu beachten ist, dass das Bohrsche Atommodell zu nicht haltbaren Vorstellungen über den Aufbau eines Wasserstoffatoms führt und deshalb nicht verwendet werden soll. Veranschaulichungen zum Wasserstoffatom aus quantenmechanischer Sicht findet man zum Beispiel unter www.hydrogenlab.de.

Die Energieabstrahlung der Sonne

Solarkonstante und Leuchtkraft

Die Solarkonstante kennzeichnet die in der Entfernung 1 AE von der Sonne auf 1 m^2 auftretende Strahlungsleistung der Sonne bei senkrechtem Einfall außerhalb der Erdatmosphäre.

Moderne Messungen ergeben $S = 1,367 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$.

Ergänzung

Die Bezeichnung „Solarkonstante“ ist irreführend, da es sich nicht wirklich um eine Konstante handelt. Die während eines Jahres variierende Entfernung Erde – Sonne führt auf Schwankungen des Werts von S im Bereich von ca. 3 %. Ferner ergeben sich kurzfristige (< 14 Tage) unregelmäßige Veränderungen von etwa 0,2 %, für die als Ursache die unterschiedliche Zahl an Sonnenflecken und

Sonnenfackeln in Betracht kommen. Auch längerfristige Schwankungen (zum Beispiel im Rahmen des 11-jährigen Sonnenzyklus) wurden beobachtet.

Quellen und weiterführende Literatur:

Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik“, WILHELY-VHC Verlag, Weinheim 2005

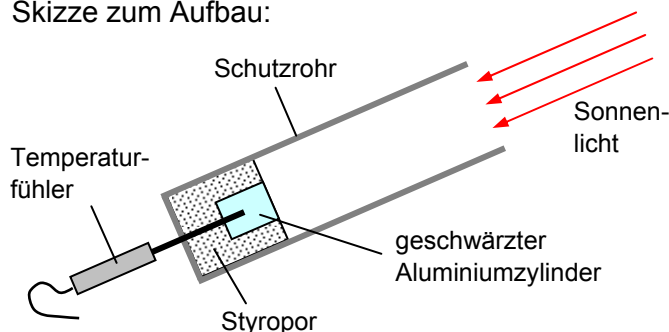
Feitzinger, „Die Solarkonstante“, Astronomie + Raumfahrt, Friedrich Verlag, Velber 2007, Ausgabe 6, Seite 11 ff.

Die Strahlungsleistung je Flächeneinheit auf der Erde, die auch in der Energiediskussion eine große Rolle spielt, soll experimentell bestimmt werden. Es hat sich bewährt, die Messungen außerhalb der Unterrichtszeit durch interessierte Schülerinnen und Schüler durchführen zu lassen bzw. das Thema als Referat zu vergeben. Dabei sind verschiedene Verfahren denkbar:

- Bei Verwendung einer Solarzelle nutzt man die Umwandlung von Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie. Man misst die abgegebene elektrische Leistung der Solarzelle und ermittelt daraus die auf die Zellenfläche einfallende Strahlungsleistung. Hierzu muss der Wirkungsgrad der Solarzelle bekannt sein.
- Wesentlich effektiver lässt sich die Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie nutzen.

Hierzu verwendet man einen Aluminiumzylinder (meist in einer Schlosserei erhältlich), dessen eine Deckfläche mit Ruß geschwärzt ist. Auf der anderen Seite befindet sich eine Bohrung zur Aufnahme eines Temperaturfühlers (vorher Wärmeleitpaste einbringen). Der Aluminiumzylinder ist zur Dämmung in Styropor gebettet und zur Abschirmung von Streulicht von einem Schutzrohr (aus Pappe, stabiler ist ein Abflussrohr aus PVC) umgeben. Als Halterung verwendet man Stativmaterial.

Skizze zum Aufbau:

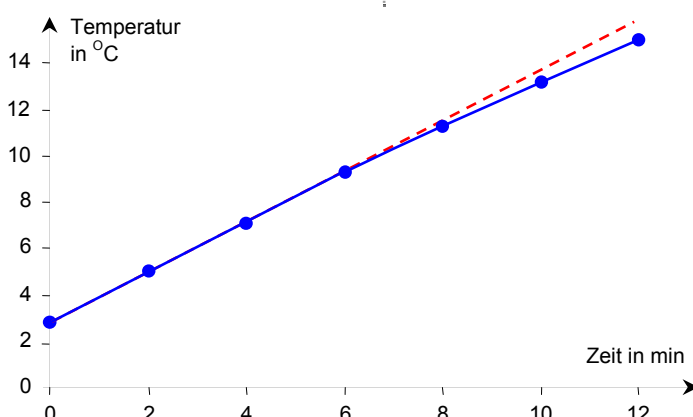


Der geschwärzte Alu-Zylinder in der Styroporummantelung.

Die Anordnung wird zunächst ins Freie gebracht und muss sich im Schatten an die Außentemperatur angleichen. Anschließend wird sie so aufgestellt, dass die Sonnenstrahlung senkrecht auf die geschwärzte Fläche auftrifft (Überprüfung am projizierten Schatten). Dann wird sofort mit der Messung der Zylindertemperatur in Zeitabständen von 2 Minuten begonnen.

Folgende Messwerte wurden mit einem derartigen Versuchsaufbau ermittelt:

Zeit t in Minuten	0	2	4	6	8	10	12
Temperaturdifferenz ϑ in $^{\circ}\text{C}$	2,8	5,0	7,1	9,3	11,3	13,2	15,0



Für die Auswertung kommt nur das Zeitintervall in Frage, in dem die Temperatur des Zylinders linear ansteigt, also der Bereich von 0 bis 6 Minuten. Zusätzlich werden folgende Daten

benötigt: $r_{\text{Zylinder}} = 2,4 \text{ cm}$, $m_{\text{Zylinder}} = 107,2 \text{ g}$, $c_{\text{Al}} = 0,896 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

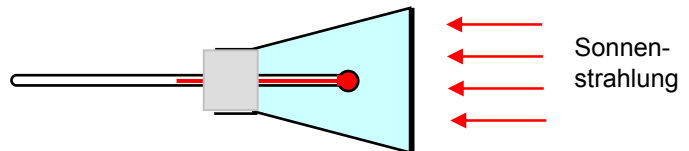
Die vom Zylinder aufgenommene thermische Energie beträgt

$E_{\text{Zylinder}} = c_{\text{Al}} \cdot m \cdot \Delta\vartheta = \dots = 624 \text{ J}$, das entspricht einer Leistung von 1,73 W.

Umgerechnet auf 1 m^2 erhält man eine aufgenommene Leistung von 0,96 kW.

An dieser Stelle ist mit den Schülerinnen und Schülern die Abweichung vom Tabellenwert zu diskutieren. Sie geht hauptsächlich auf die Absorption durch die Atmosphäre und einen Wirkungsgrad der Apparatur kleiner 100 % zurück. Ferner gilt es zu klären, warum bei der verwendeten Anordnung ab einer Messdauer von 6 Minuten der Temperaturanstieg nicht mehr linear erfolgt ist. Ab diesem Zeitpunkt macht sich eine unerwünschte Abstrahlung vor allem durch die berußte Zylinderfläche bemerkbar.

Das Experiment lässt sich auch als Gruppenarbeit realisieren. Hierzu bietet sich der folgende einfache Versuchsaufbau an: Ein Erlenmeyerkolben (Volumen maximal 150 ml) wird



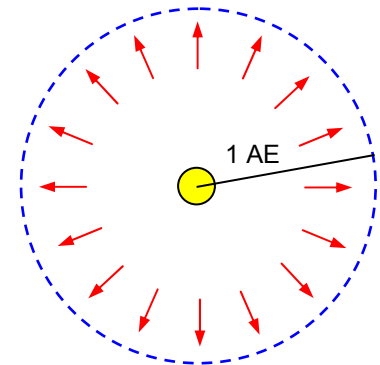
vollständig mit Wasser gefüllt und mit einem Gummistopfen verschlossen, in dessen Bohrung ein Thermometer (Genauigkeit von $0,2^\circ \text{ C}$) eingebracht ist. Der Boden des Kolbens muss außen mit Farbe oder Ruß geschwärzt sein. Die weitere Vorgehensweise entspricht dann der mit dem Aluminiumzylinder. Allerdings lässt sich der Inhalt der geschwärzten Fläche nicht so genau ermitteln.

Hat man die Solarkonstante bestimmt, so ist es für die Schülerinnen und Schüler oft überraschend, wie einfach sich daraus die gesamte Strahlungsleistung L der Sonne (d. h. ihre Leuchtkraft; wieder ein unglücklicher, aber in der Literatur traditionell verwendeter Begriff) berechnen lässt.

Im Abstand 1 AE von der Sonne trifft bei senkrechtem Einfall auf jeden Quadratmeter die Leistung 1,367 kW. Zur Berechnung der Strahlungsleistung legt man eine gedachte Kugel mit Radius 1 AE um den Sonnenmittelpunkt und multipliziert die

$1,367 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ mit der Kugeloberfläche in m^2 . Unter der Annahme isotroper Abstrahlung erhält

man $L = 3,845 \cdot 10^{23} \text{ kW}$.



Im Gegensatz zur gut nachvollziehbaren Solarkonstanten ist dieser Wert unvorstellbar groß und sollte unbedingt veranschaulicht werden: Die von der Sonne in einer Sekunde abgegebene Energie würde reichen, um den Primärenergiebedarf Deutschlands für etwa 27 Millionen Jahre zu decken (dieser liegt seit Jahren bei etwa $14 \cdot 10^{18} \text{ J}$ pro Jahr,

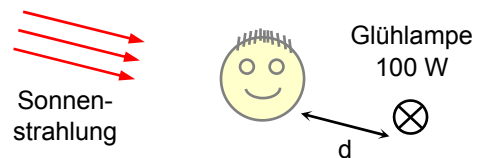
→ <http://ag-energiebilanzen.de>).

Ein **Freihandversuch** zur Abschätzung der Sonnenleuchtkraft:

Der im Folgenden beschriebene Versuch kann selbstverständlich nur eine sehr grobe Abschätzung der Sonnenleuchtkraft liefern. Während die Sonne sowohl im infraroten und sichtbaren als auch im ultravioletten Bereich Strahlung emittiert, entfallen bei der Glühlampe etwa 90 % ihrer Leistung auf den Infrarotbereich. Trotzdem ist es erstaunlich, dass nur mit Hilfe einer Glühlampe und der Empfindung auf der Haut (und einer kleinen Rechnung) bereits eine Aussage über die Größenordnung der Sonnenleuchtkraft möglich ist.

Erforderliche Geräte: Glühlampe mit 100 W in einer berührungssicheren Fassung, Netzanschlusskasten mit Schalter, Verlängerungskabel, Meterstab.

Durchführung: Bei absolut windstillem Wetter (!) hält eine Schülerin oder ein Schüler sein Gesicht so in die Sonne, dass eine Wange möglichst senkrecht vom Sonnenlicht beschienen wird. Der Wange auf der sonnenabgewandten Seite wird die leuchtende Glühlampe genähert, bis sich der gleiche Wärmeindruck einstellt. Die Entfernung d zwischen Wange und Glühwendel wird gemessen.



Auswertung: Für beide Strahler gilt das quadratische Abstandsgesetz.

Bei gleicher Wärmeempfindung auf beiden Wangen gilt dann
$$\frac{L_{\odot}}{4\pi \cdot (1AE)^2} = \frac{100 \text{ W}}{4\pi \cdot d^2}.$$

Hieraus lässt sich ein Näherungswert für die Sonnenleuchtkraft berechnen.

Quelle: Bammes, Herbst, Reger, „Handreichungen für den Physikunterricht am Gymnasium“, Band 3, ISB München, 1993

Das Gesetz von Stefan-Boltzmann und das Wiensche Verschiebungsgesetz

Sind die physikalischen Eigenschaften eines Strahlung abgebenden Körpers bekannt, kann man daraus auch Aussagen über dessen Oberflächentemperatur folgern.

Nicht selten haben Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten mit der Vorstellung, dass jeder Körper, abhängig von seiner Temperatur, elektromagnetische Strahlung abgibt. Stehen eine Thermosäule zusammen mit einem Spannungsmessverstärker oder ein Strahlungsthermometer zur Verfügung, so lässt sich dies in wenigen Minuten experimentell demonstrieren. Man richtet die Thermosäule gegen eine Zimmerwand und hält abwechselnd ein Becherglas mit Eiswasser sowie zum Beispiel eine warme Handfläche vor die Thermosäule und beobachtet den Ausschlag des Messgerätes.

Mit der revolutionären Idee, dass ein Temperaturstrahler seine Energie nicht kontinuierlich, sondern in Quanten der Größe $h \cdot f$ emittiert, gelang es Max Planck 1900 erstmals, die Flächenleistungsdichte eines Schwarzen Strahlers für den gesamten Wellenlängenbereich in absoluter Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden zu beschreiben.

Ergänzungen

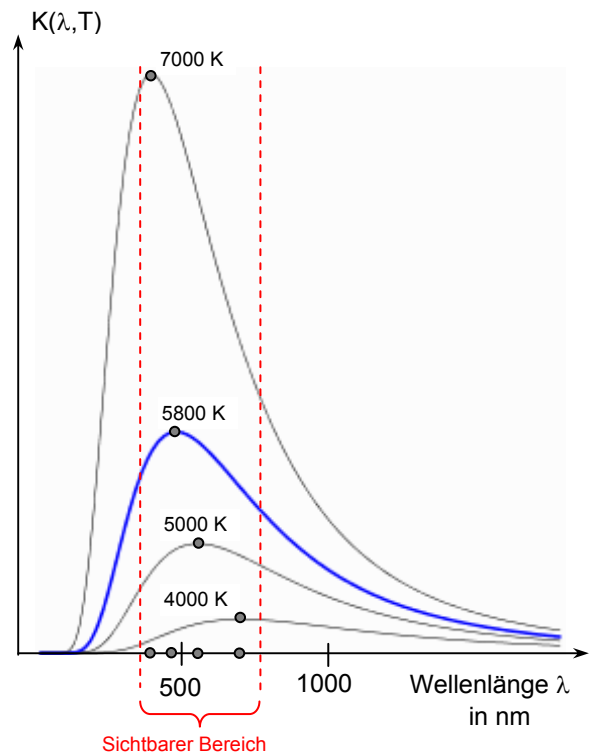
- a) Zu seiner Idee meint Max Planck: „Das war eine rein formale Annahme, und ich dachte mir eigentlich nicht viel dabei, sondern nur eben das, dass ich unter allen Umständen, koste es, was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen wollte“. Dieses Zitat stammt aus „Sternstunden der Physik“ von Thomas Bürcke, Verlag C. H. Beck, München 1997. Das lesenswerte Buch wird allen empfohlen, die an der Entwicklungsgeschichte zu derart fundamentalen Gesetzen und an Hintergründen zur Person ihrer Entdecker interessiert sind.

b) Die Planck'sche Strahlungsformel

$$K(\lambda, T) = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot kT}} - 1}$$

beschreibt in Abhängigkeit von Wellenlänge und Temperatur die je Flächeneinheit abgegebene Strahlungsleistung. Ist A die Oberfläche des Schwarzen Strahlers, so gibt der Ausdruck $A \cdot K(\lambda, T) d\lambda$ die Strahlungsleistung im Wellenlängenbereich zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ an. Durch Integration über sämtliche Wellenlängen erhält man somit die gesamte vom Schwarzen Körper abgestrahlte Leistung. Das heißt mit anderen Worten, dass sich aus der Planck'schen Strahlungsformel das Stefan-Boltzmann-Gesetz ableiten lässt:

$$\Phi = \int_0^{\infty} A \cdot K(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

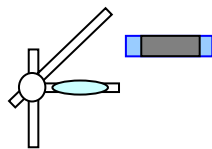


Ein interessantes Applet zum Planck'schen Strahlungsgesetz findet man auf der Seite http://webphysics.davidson.edu/alumni/MiLee/java/bb_mjl.htm (Stand Mai 2008).

Lehrkräfte, die eine experimentelle Veranschaulichung suchen, sollten Folgendes ausprobieren:

Das Schreibfeld eines Tageslichtprojektors (TLP) wird mit einem dünnen Karton vollständig abgedeckt. In der Mitte des Kartons wird eine spaltförmige Öffnung herausgeschnitten. Vor den TLP setzt man ein Geradsichtprisma und erzeugt damit im vollständig abgedunkelten Raum ein intensives kontinuierliches Spektrum. Mit Hilfe der Schalttafel oder eines regelbaren Netztrenntrafos (jedoch in keinem Fall mit einem der gängigen Regelwiderstände; diese sind nur für Kleinspannungen zulässig) wird der TLP nun „gedimmt“, das heißt die Temperatur der Glühwendel gesenkt. Im Spektrum sind schließlich nur noch die Rot- und Grünanteile zu sehen. Man sollte zügig vorgehen, da durch das Dimmen des TLP auch die Wirksamkeit von dessen Lüfter eingeschränkt ist.

Optik des TLP und Geradsichtprisma



Spektrum bei maximaler Intensität des TLP



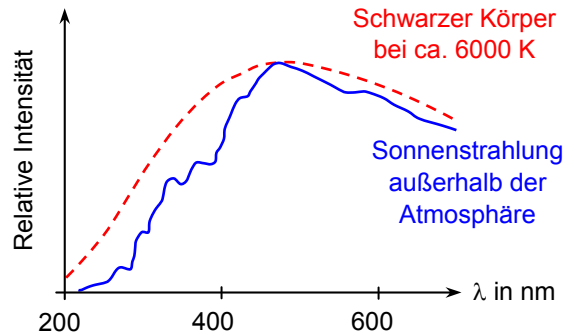
Spektrum bei reduzierter Intensität des TLP

Für das weitere Verständnis sind das Gesetz von Stefan-Boltzmann $\Phi = \sigma A T^4$

(mit $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) und das Wiensche Verschiebungsgesetz $\lambda_m T = b$

(mit $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$) unerlässlich. Es ist zwar keinesfalls daran gedacht, die Gesetze experimentell oder theoretisch herzuleiten, jedoch eignet sich die Graphik zum Planck'schen Strahlungsgesetz (s. o.) sehr gut zur Veranschaulichung des Wienschen Verschiebungsgesetzes: Die grauen Punkte, die die jeweiligen Maxima der Graphen markieren, sind bei höheren Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben.

Die nebenstehende Graphik zeigt, dass die Sonne zwar kein idealer Schwarzer Strahler ist, aber in erster Näherung doch als solcher behandelt werden kann.



Nun lässt sich mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die Temperatur der Photosphäre (effektive Oberflächentemperatur T_{eff}) bestimmen. Die Berechnung erfolgt durch die Schülerinnen und Schüler.

Das Wiensche Verschiebungsgesetz eignet sich zur Berechnung der Oberflächentemperatur nicht besonders gut. Durch die Strahlungsabsorption in der Sonnenatmosphäre (\rightarrow Fraunhoferlinien) wird die Intensitätsverteilung verfälscht, so dass sich das tatsächliche Intensitätsmaximum experimentell nicht präzise ermitteln lässt. In der Literatur findet man einen Wert von etwa 460 nm. Die daraus errechnete Oberflächentemperatur weicht entsprechend von T_{eff} ab.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz kann auch für Temperaturabschätzungen von Planetenoberflächen benutzt werden, wenn man davon ausgeht, dass diese Oberflächen Schwarze Strahler sind.

Die Erde befindet sich näherungsweise im Strahlungsgleichgewicht. Die von der Querschnittsfläche der Erde absorbierte Strahlung wird von der gesamten Erdoberfläche wieder abgestrahlt. Bezieht man die *Albedo* (das Rückstrahlvermögen) der Erde von etwa 0,3 ein, ergibt sich der Ansatz $4\pi \cdot R_{\text{Erde}}^2 \cdot \sigma \cdot T^4 = \pi \cdot R_{\text{Erde}}^2 \cdot S \cdot 0,7$. Hieraus folgt eine Temperatur von 255 K (entspricht -18°C). Die Diskrepanz zur gemessenen mittleren Temperatur der Erdoberfläche von etwa 14°C erklärt sich dadurch, dass die Atmosphäre Wasserdampf enthält und deshalb von der auf die Erde einfallenden kurzwelligeren Strahlung mehr durchgelassen wird, als von der nach außen abgegebenen langwelligeren Strahlung (Treibhauseffekt).

Eine entsprechende Überlegung lässt sich zum Beispiel auch für Jupiter anstellen. Dessen Albedo beträgt ca. 0,5. Die Rechnung liefert mit etwa 105 K eine niedrigere Temperatur, als mit den Sonden real gemessen wurde. Also gibt der Riesenplanet mehr Energie ab, als er aufnimmt. Womöglich wird Gravitationsenergie durch Kontraktion frei, auch radioaktive Zerfälle kommen in Betracht. Die genaue Ursache ist noch nicht geklärt. Auch Saturn und Neptun zeigen diesen Effekt, nicht jedoch Uranus.

„Energieerzeugung“ im Inneren der Sonne

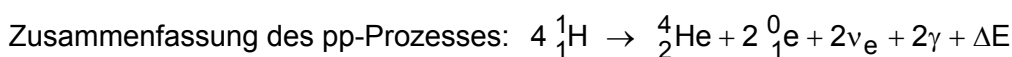
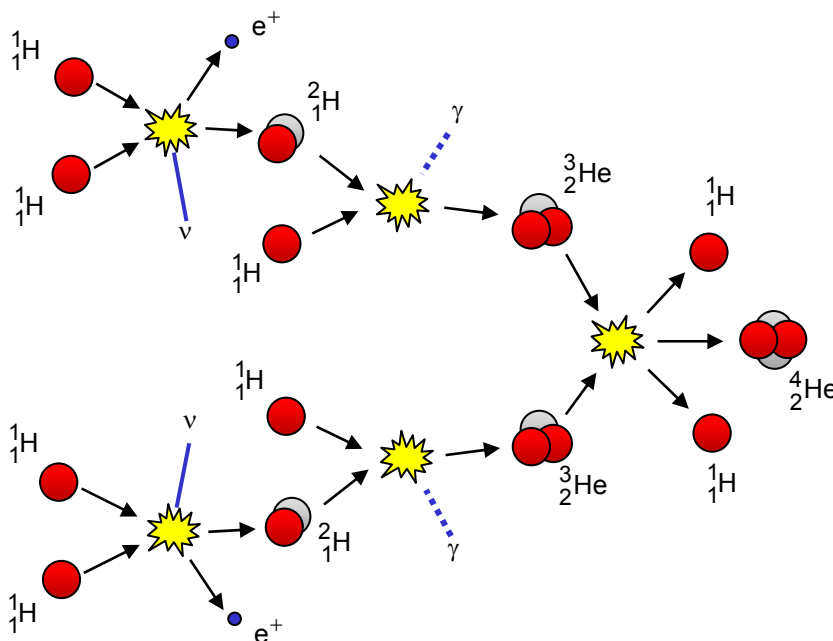
Die Sonne gibt je Sekunde $3,845 \cdot 10^{26} \text{ J}$ an Strahlungsenergie ab. Die zentrale Frage ist, woraus sie diese unvorstellbar große Energiemenge bezieht. Zur Beantwortung wurden verschiedene Theorien aufgestellt:

- Früheren Annahmen zufolge könnten es chemische Vorgänge, z. B. die Verbrennung von Kohle, sein. Abschätzungen mit dem Heizwert von Kohle führen jedoch auf ein viel zu geringes Alter der Sonne von 5 000 Jahren.
- Nimmt man dagegen an (Helmholtz, um 1870), die Strahlungsenergie würde aus der Gravitationskontraktion der Sonnenmasse auf den gegenwärtigen Radius gewonnen, so folgt daraus ein „Gravitationsalter“ der Sonne von 32 Millionen Jahren. Doch auch dieses Alter erfasst nur wenige Promille des gegenwärtig von der Geologie bzw. Kosmologie angegebenen Alters von Erde und Sonne.
- Heute besteht kein Zweifel darüber, dass die Strahlungsenergie der Sonne aus Kernfusionsprozessen gewonnen wird. Dies wurde erstmals 1937 von Hans Albrecht Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker unabhängig voneinander theoretisch nachgewiesen.

Den Schülerinnen und Schülern ist die Einstein'sche Masse-Energie-Beziehung $E = mc^2$ von der 11. Jahrgangsstufe her bekannt (\rightarrow Ph 11.3). Aus der Kernphysik sollen nur die für die Astrophysik wichtigen Aspekte besprochen werden:

- Massendefekt und Kernbindungsenergie,
- graphische Darstellung der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl A.

Bei Sternen mit einer Zentraltemperatur von etwa $5 \cdot 10^6$ bis $15 \cdot 10^6$ K ist der Proton-Proton-Prozess der maßgebliche Fusionsvorgang, zwischen $15 \cdot 10^6$ K und $30 \cdot 10^6$ K ist es der CNO-Zyklus. In der Sonne läuft also hauptsächlich der Proton-Proton-Prozess ab, den es nun, zum Beispiel unter Verwendung der folgenden Graphik oder der entsprechenden Präsentation (**CD** Zusatzmaterial, pp-Prozess.ppt) zu erläutern gilt. Den CNO-Zyklus wird man lediglich kurz erwähnen.



$$\text{Energiebilanz: } (4 \cdot m_{\text{H}} - m_{\text{He}} - 2 \cdot m_{e^+}) \cdot 931,49 \text{ MeV} + 4 \cdot 0,511 \text{ MeV} - 0,52 \text{ MeV} = 26,2 \text{ MeV}$$

Energie aus der Bilanz der Teilchenmassen
Zerstrahlung der beiden Positron-Elektron-Paare
Von den beiden Neutrinos abgeführte Energie (Mittelwert)

Diese 26,2 MeV entsprechen einer in Energie umgesetzten Masse von 0,02814 u. Da die vier Protonen eine Masse von 4,0291 u besitzen, errechnet sich daraus ein „Massenwirkungsgrad“ von rund 0,7 %.

Im Zusammenhang mit den Fusionsprozessen ist die Massenabnahme der Sonne pro

Sekunde interessant. Aus $\Delta E = \Delta m c^2$ folgt $\Delta m = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} \approx 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg}$.

Wenn man als Beispiel bei einem mittleren LKW von 4 t Zuladung ausgeht, entspricht das der Ladung von rund einer Million LKW pro Sekunde. Trotzdem ist diese Masse im Vergleich zur Gesamtmasse der Sonne verschwindend klein.

Für eine Abschätzung der mittleren Lebensdauer der Sonne nimmt man eine ursprünglich vorhandene Masse von $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ an. Deren Wasserstoffanteil beträgt 75 % (da in der Photosphäre keine Fusionsprozesse stattfinden, ist von deren heutiger Zusammensetzung aus ca. 75 % Wasserstoff und ca. 25 % Helium auszugehen). Ferner kann man, wie bei Hauptreihensternen üblich, annehmen, dass nur rund 10 % des gesamten Wasserstoffvorrats fusioniert werden. Zusammen mit dem Wirkungsgrad von 0,7 % ergibt sich als Lebensdauer

$$\tau \approx \frac{0,75 \cdot 0,1 \cdot M \cdot 0,007}{\frac{\Delta m}{1\text{s}}} \approx 8 \cdot 10^9 \text{ a}.$$

Genauere Überlegungen führen auf den heute gängigen Wert von etwa 10 Milliarden Jahre.

Es ist also zu erwarten, dass die Sonne deren Alter etwa 4,5 Mrd. Jahre beträgt, noch weitere 5,5 Mrd. Jahre in der uns bekannten Form fortbesteht. Danach wird sie sich zu einem sogenannten Roten Riesen weiterentwickeln. Genaueres dazu findet sich im Kapitel 1.4.

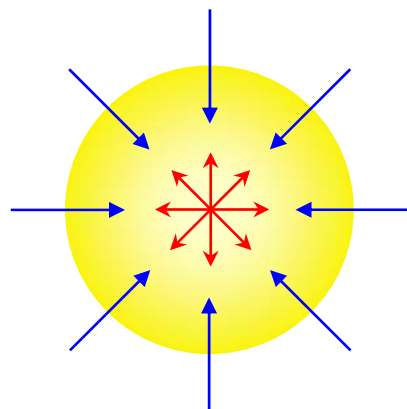
Aufbau der Sonne und Energietransport

Nachdem sich ein Stern gebildet hat, verweilt er die meiste Zeit seiner Existenz in einem stabilen Zustand, in dem sich der Gas- und Strahlungsdruck einerseits und der Gravitationsdruck andererseits das Gleichgewicht halten.

Auf eine Herleitung von Näherungen zu Druck und Temperatur im Sonneninneren sollte man im Unterricht verzichten, da sie für den weiteren Verlauf nicht relevant sind.

Man zeigt besser die aus einer Modellrechnung stammende Tabelle mit den zugehörigen Diagrammen.

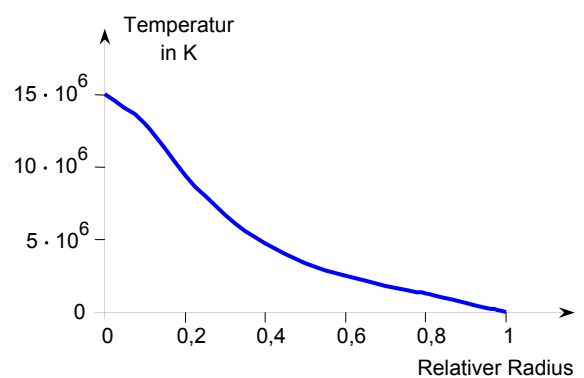
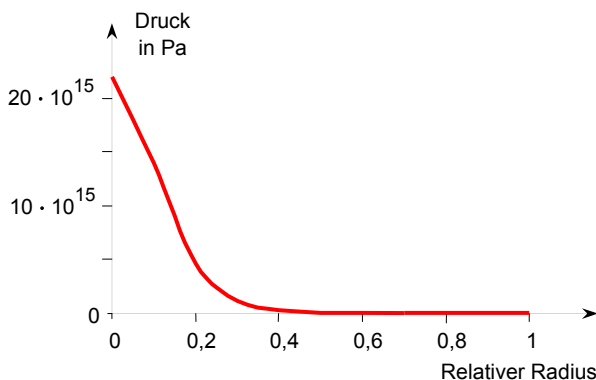
Derartige Modellrechnungen sind sehr komplex, so dass es nicht verwunderlich ist, wenn abhängig vom gerechneten Modell die Literaturangaben differieren.



In der folgenden Tabelle finden sich die Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Dichte der Sonne in Abhängigkeit vom relativen Abstand zum Zentrum r/R_0 , wobei R_0 der Sonnenradius ist.

$\frac{r}{R_0}$	Druck in Pa	Temperatur in K	Dichte in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
0,0	$22 \cdot 10^{15}$	$15 \cdot 10^6$	134
0,1	$14 \cdot 10^{15}$	$13 \cdot 10^6$	86
0,2	$4,6 \cdot 10^{15}$	$9,4 \cdot 10^6$	36
0,3	$1,2 \cdot 10^{15}$	$6,7 \cdot 10^6$	13
0,4	$0,27 \cdot 10^{15}$	$4,7 \cdot 10^6$	4,1
0,5	$60 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^6$	1,3
0,6	$14 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^6$	0,41
0,7	$3,0 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^6$	0,12
0,8	$6,1 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^6$	0,035
0,84	$3,0 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^6$	0,02
0,9	$7,8 \cdot 10^{10}$	$0,61 \cdot 10^6$	0,009
0,98	$1,1 \cdot 10^9$	$0,11 \cdot 10^6$	0,0008
1,0	$0,6 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-8}$

Quelle: Ulrich, „Astrowissen“, Franckh-Komos Verlag, Stuttgart 2003



Man kann bei den hohen Temperaturen im Zentralbereich der Sonne davon ausgehen, dass die Materie – vor allem Wasserstoff – dort vollständig ionisiert ist, also ein Plasma vorliegt. Trotzdem kann auch bei derart hohen Temperaturen die Coulomb-Barriere für die Fusion im Rahmen des pp-Prozesses nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit überwunden werden. Hier spielt der Tunneleffekt eine wesentliche Rolle. Die Teilchen „durchtunneln“ die Barriere und es kommt zur Fusion. Die Konsequenz ist, dass Sonne nicht explosiv „verbrennt“, sondern nur sehr langsam.

Die im Sonnenkern entstehenden Neutrinos liefern die einzige „Sofortinformation“ der Fusionsprozesse (Laufzeit ca. 8 min). Aber ihr Nachweis stellt aufgrund der äußerst geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit eine große Herausforderung der Sonnenforschung dar.

Ergänzung

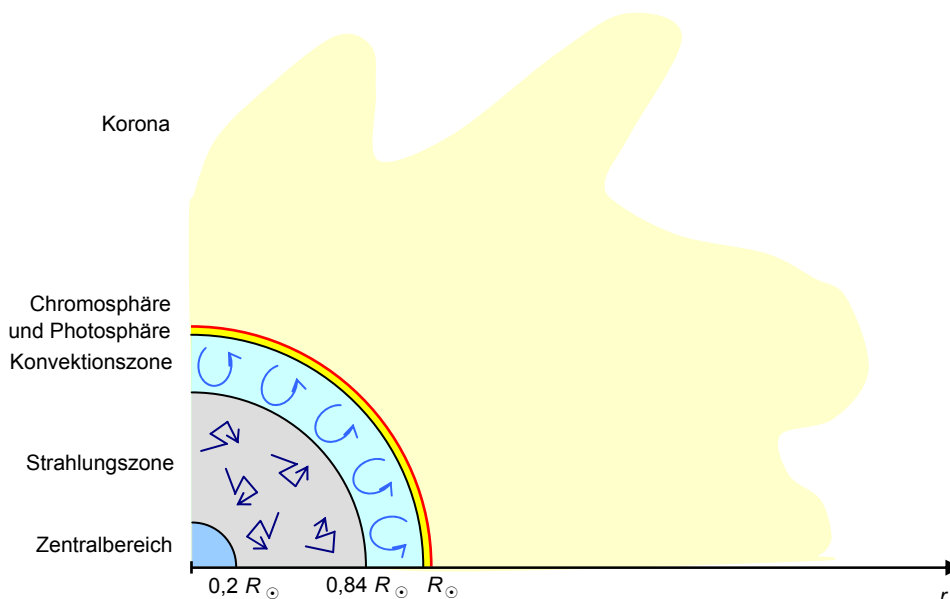
Pro Sekunde durchdringen 10^{14} Neutrinos den menschlichen Körper, es kommt aber nur zu etwa einer Wechselwirkung im ganzen Leben. Blei hat bzgl. Neutrinos eine Halbwertsdicke von ca. 100 Lichtjahren!

Innerer und äußerer Aufbau der Sonne

Die Vorstellung vom inneren Aufbau der Sonne geht aus den bereits erwähnten Modellrechnungen hervor. Die Kenntnisse über den äußeren Aufbau der Sonne stammen von Beobachtungen und Messungen.

	Bereich	Ausdehnung	Erläuterungen
Innerer Bereich	1 Zentralbereich	Radius ca. $1,5 \cdot 10^5$ km	ca. 94 % der Energiegewinnung der Sonne; ca. 35% der Sonnenmasse; Plasmazustand der Materie.
	2 Strahlungszone	Dicke ca. $4,5 \cdot 10^5$ km	Energietransport nur durch Strahlung (Photonen); stabile Schichtung; ca. 64 % der Sonnenmasse; Plasma.
	3 Konvektionszone	Dicke ca. $1,0 \cdot 10^5$ km	Energietransport durch Gasströmung in mehreren, nach oben dünner werdenden Schichten; erste Rekombinationen.
Außenschichten	4 Photosphäre	Dicke wenige 100 km	Einzige direkt sichtbare Schicht, von der nahezu die gesamte sichtbare Strahlung ausgeht; sehr dünn im Vergleich zum Sonnenradius, deshalb erscheint die Sonne scharf begrenzt.
	5 Chromosphäre	Dicke einige 10^3 km	Zone mit nach außen stark abnehmendem Druck, aber deutlichem Temperaturanstieg; äußerst geringe Strahlungsintensität, deshalb nur bei Sonnenfinsternis oder mit Koronograph als dünne rötlich leuchtende Schicht sichtbar.
	6 Korona	bis zu einigen R_{\odot}	Strahlenförmige Schicht mit extrem geringer Strahlungsintensität, ebenfalls nur bei Sonnenfinsternis oder mit Koronograph sichtbar, Aufheizung bis zu einigen Millionen K, Form stark von der Sonnenaktivität abhängig. Die ständig in das Universum entweichende Koronamaterie heißt <i>Sonnenwind</i> (Partikelstrom aus freien Elektronen und Atomkernen, hauptsächlich H-Kerne und He-Kerne). Der Sonnenwind weist starke Schwankungen auf.

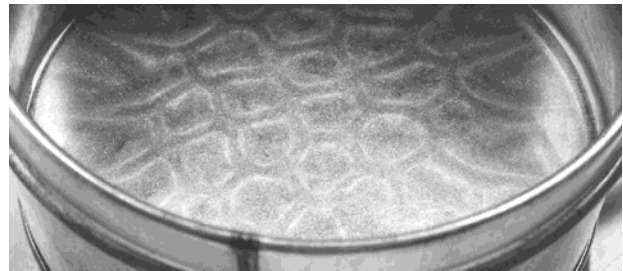
Veranschaulichung



Der Energietransport durch Photonen (hauptsächlich γ -Quanten) vom Fusionsgebiet des Sonnenkerns zum Sonnenrand benötigt im Mittel einen Zeitraum der Größenordnung 10^7 Jahre, den die Photonen werden auf Ihrem Weg von Sonnenzentrum zur Oberfläche immer und immer wieder gestreut. Im Vergleich dazu sind die Neutrinos, die vom Sonneninneren zur Erde gelangen, extrem kurz unterwegs, nämlich nur etwa 8 Minuten. Um die aktuell ablaufenden Prozesse in der Sonne zu untersuchen, eignen sich die Photonen demnach nicht, sondern die Neutrinos, die jedoch kaum wechselwirken.

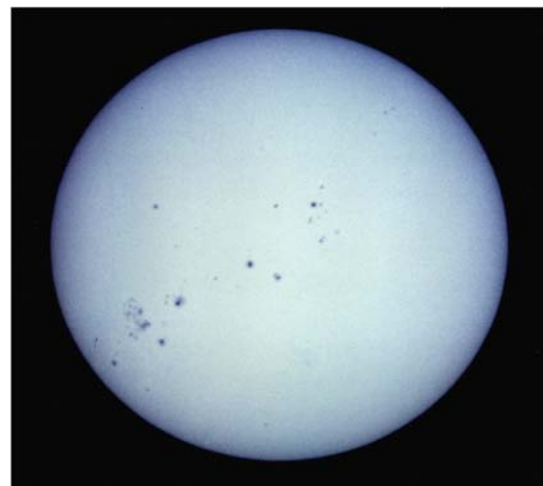
Die Photosphäre zeigt eine kleinräumige Helligkeitsstruktur, die im guten Fernrohr direkt beobachtbare *Granulation* (Schutzmaßnahmen siehe Kapitel 2.4). Sie ist durch die Konvektion der oberflächennahen Schichten erklärbar.

Um sie im Modell zu demonstrieren, kann man folgendes einfache Experiment durchführen: In eine Blechdose gibt man eine einige Millimeter hohe Ölschicht, (zum Beispiel Paraffinöl), die man mit Aluminiumpulver vermischt. Die kalte Dose stellt man auf eine heiße Kochplatte und kann nach einiger Zeit die Bildung der Konvektionszellen verfolgen. Ist das Öl erhitzt, lösen sich die Zellen wieder auf. Nach kurzem Abkühlen kann man das Entstehen der Zellen erneut beobachten. Die Größe der Zellen ist von der Höhe der Flüssigkeitsschicht abhängig. Als Ersatz (nicht ganz so schön) kann man Milch und ein handelsübliches mit Zucker versehenes Kakaopulver kalt anmischen, auf die Kochplatte stellen und erhitzen.



Sonnenflecken sollten unbedingt direkt beobachtet werden, wenn die Möglichkeit dazu besteht. Sie besitzen einen dunklen Kern, die Umbra (Durchmesser im Bereich von 5 000 km bis zu 20 000 km) und eine nicht so dunkle Penumbra (hier wurden schon Durchmesser bis zu 200 000 km beobachtet). Sonnenflecken tendieren zur Gruppenbildung, wie die nebenstehende Abbildung zeigt. (Auf dem Bild ist auch die sogenannte Randverdunklung gut zu sehen.)

Aus systematischen Beobachtungen von Sonnenflecken ergeben sich Aussagen zur Rotationsdauer der Sonne. Sie beträgt rund 25 Tage am Sonnenäquator und nimmt Richtung Sonnenpole auf über 30 Tage zu. Dies bezeichnet man als differenzielle Rotation. Ferner zeigen solche Beobachtungen, dass der Sonnenäquator um $7^\circ 15'$ gegen die Ekliptik geneigt ist.



mit freundlicher Genehmigung der Volkssternwarte Alzenau

Die Häufigkeit der Sonnenflecken unterliegt einem durchschnittlich elfjährigen Zyklus. Zu Beginn eines neuen Zyklus bilden sich die Flecken in einem Bereich von etwa 30° bis 35° Breite oberhalb bzw. unterhalb des Sonnenäquators. Ist der Zyklus fortgeschritten, entstehen die Flecken in geringeren Breiten. Die Sonnenpole sind frei von Sonnenflecken. In einem Fleckenmaximum hat auch die Solarkonstante ihren höchsten Wert.

Die Bildung von Sonnenflecken ist stets mit besonders starken magnetischen Aktivitäten verbunden. Die differentielle Rotation der Sonne führt zur Verdrillung von magnetischen Feldlinien und zur Ausbildung „magnetischer Schläuche“ mit Feldstärken bis zu 0,4 Tesla

(zum Vergleich: das Magnetfeld der Erde hat an ihrer Oberfläche einen Wert von etwa $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$). Die magnetischen Schläuche steigen zur Sonnenoberfläche empor, wölben sich nach außen, und bilden so „magnetische Flecken“, welche die Energiezufuhr zur Sonnenoberfläche unterbinden. Die entsprechenden Bereiche der Sonnenoberfläche kühlen um etwa 1500 K ab und erscheinen gegenüber ihrer Umgebung dunkler. Die Bezeichnung „dunkler Fleck“ führt aber leicht zu einer Fehlvorstellung. Ein Sonnenfleck vom Durchmesser des Mondes würde sich am Nachthimmel immerhin deutlich heller als der Vollmond erweisen.

Die Lebensdauer von Sonnenflecken beträgt in der Regel wenige Tage. Es wurden aber auch Flecken beobachtet, die sich Wochen bis Monate hielten.

Mit Hilfe des Zeeman-Effekts ließ sich unter anderem die Polarität der größeren, meist paarweise auftretenden Sonnenflecken bestimmen. Dabei erwies sich die magnetische Polarität im Verlauf eines elfjährigen Fleckenzklus als konstant. Das bedeutet, alle Flecken auf einer Seite des Sonnenäquators waren zum Beispiel magnetische Nordpole, die auf der anderen Seite magnetische Südpole. Beim darauffolgenden Zyklus waren die Verhältnisse genau umgekehrt. Hinsichtlich der magnetischen Aktivität dauert ein Zyklus also etwa 22 Jahre.

Auf die in der folgenden Tabelle aufgeführten Phänomene, die alle deutlich von der Aktivität der Sonne abhängen, wird man anhand von Bildern in aller Kürze eingehen. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, dass sich die Schülerinnen und Schüler zum Beispiel anhand des Lehrbuchs diese Erscheinungen selbständig erarbeiten.

Protuberanz (auch Filament)	<p>Protuberanzen sind bei totaler Sonnenfinsternis oder mit Koronograph und monochromatischem Filter in der inneren Sonnenkorona sichtbare, leuchtende Materiewolken. In der „Draufsicht“ auf die Sonnenscheibe sind sie im Spektroheliogramm der Chromosphäre als dunkle, schmal-längliche Strukturen zu sehen und werden dann als Filamente bezeichnet.</p> <p>Ruhende Protuberanzen: Diese entstehen hauptsächlich in wenig aktiven, fleckenfreien Gebieten, sind langlebig (bis zu zehn Rotationsperioden) und können große Höhen erreichen (deutlich über 100 000 km). Ihre Materie befindet sich im Plasmazustand und ist an Magnetfelder gekoppelt, d. h. ihre Struktur wird vom Magnetfeld bestimmt.</p> <p>Aktive Protuberanzen: Sie entstehen hauptsächlich in aktiven Gebieten über Sonnenflecken, es handelt sich um kurzlebige (Minuten bis Stunden) dynamische Strukturen, die vielfach Bögen und Schleifen aufweisen.</p>
Eruption (auch Flare)	<p>Eruptionen sind durch Magnetfelder hervorgerufene, plötzliche Strahlungsausbrüche in der Chromosphäre, bei denen (verbunden mit einem deutlichen Temperaturanstieg) lokal riesige Energiemengen freigesetzt werden. Man findet sie meist in Verbindung mit größeren Sonnenfleckengruppen. Eine Eruption hält sich im Mittel je nach Größe 10 bis 90 Minuten und ist am günstigsten mit einem H_{α}-Filter zu beobachten. Häufig bilden sich in Verbindung mit Eruptionen sogenannte Plasma-Magnetfeldbögen aus, bei deren Ablösung ein erheblicher Massenausstoß stattfindet. Bei normaler Sonnenaktivität lassen sich etwa 5 bis 10 Flares pro Tag registrieren.</p>
Fackel	<p>Fackeln sind helle, faserige Aufhellungen in der Umgebung von Sonnenflecken. Fackelgebiete entstehen in der Regel zeitlich vor den Sonnenflecken, ihre Lebensdauer ist durchschnittlich dreimal so groß wie die der Sonnenflecken.</p>

Ergänzung

Sonnenflecken führen während ihres Auftretens zu einer leichten Erniedrigung der Sonnenleuchtkraft, während sie durch Flares und Fackeln etwas ansteigt. Bilanziert man diese Erscheinungen, so lässt sich eine geringfügiger Erhöhung der Sonnenleuchtkraft verzeichnen.

Quellen: Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995
Ulrich, „Astrowissen“, Franckh-Komos Verlag, Stuttgart 2003

Solar-terrestrische Beziehungen

Als *solar-terrestrische Beziehungen* bezeichnet man die unterschiedlichen Erscheinungen, die mit erhöhter Sonnenaktivität und Strahlungsausbrüchen zusammenhängen.

- Die Emission von Röntgenstrahlung ist im Zusammenhang mit Protuberanzen erhöht.
- Flares und Radiobursts (Strahlungsausbrüche im Radiobereich) wirken sich auf der Erde durch eine zum Teil starke Erhöhung der Ionisierung in der Ionosphäre sowie eine deutliche Deformationen des Erdmagnetfeldes (magnetische Stürme) aus. Dadurch können sich heftige Störungen im Funkverkehr, Überspannungen in Leitungen und intensive Polarlichter ergeben.
- Biologische Vorgänge stehen in Verbindung mit dem Sonnenfleckenzyklus. So sind Korrelationen der Sonnenaktivität mit dem Wetter (Niederschlagsmenge, Temperatur und Blitzhäufigkeit), mit dem Pflanzenwachstum (Breite der Jahresringe bei Bäumen), und mit Wohlbefinden von Menschen und Tieren beobachtbar; sie bedürfen vielfach noch einer genauen Klärung.

1.4 Sterne

Im vorigen Abschnitt wurden mit der Sonne sowohl der Aufbau also auch Oberflächendetails eines typischen Sterns vorgestellt. In diesem Kapitel soll nun einsichtig werden, dass es auch bei allen anderen Sternen die Analyse der elektromagnetischen Strahlung ist, die uns ein Bild von der physikalischen Natur dieser Sterne liefert, obwohl nur integrale Zustandsgrößen beobachtet und untersucht werden können.

Wie die Sonne auch sind Sterne Kugeln heißen Gases, die durch ihre eigene Gravitation zusammengehalten werden. Sie geben enorme Mengen an elektromagnetischer Strahlung ab und beziehen die Energie hierfür aus Kernprozessen, die im Sternzentrum ablaufen.

Entfernungsbestimmung und Bewegung von Sternen

Unter den vielen Ergebnissen der Astronomie sind es häufig die unvorstellbaren Entfernungen, welche die Schülerinnen und Schüler am meisten faszinieren. Stellt man sich Sterne in einem Modell als Äpfel vor, dann liegen sie so weit entfernt, dass man in etwa in jeder Hauptstadt Europas einen Apfel findet. Dabei dienen Angaben zur Entfernung der Sterne nicht nur dazu, ihre Verteilung im Raum zu erfassen. In der Astrophysik lassen sich aus der Entfernung auch weitere Zustandsgrößen von Sternen ermitteln. Dabei kommen sowohl geometrische als auch photometrische Methoden zum Einsatz. Die verschiedenen Verfahren zur Entfernungsbestimmung unterscheiden sich in der Regel deutlich hinsichtlich ihrer „Reichweite“, ihrer Genauigkeit und ihres Verwendungszwecks.

Die jährliche Parallaxe

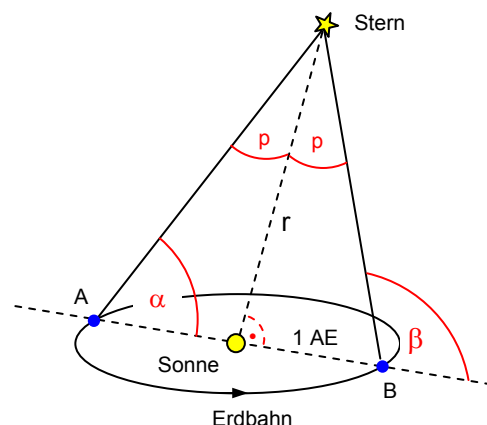
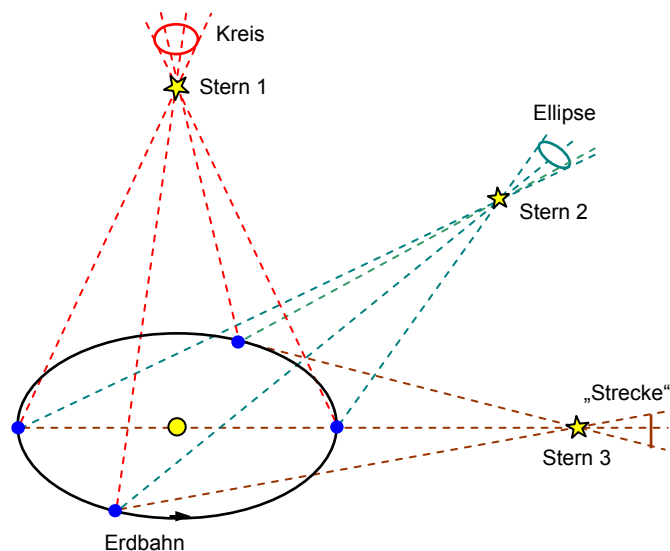
Sehr weit entfernte Sterne ändern von der Erde aus betrachtet ihre Position gegenüber dem Fixsternhintergrund im Verlauf eines Jahres praktisch nicht.

Nahe Sterne beschreiben jedoch gegenüber dem Fixsternhintergrund je nach ihrer Lage zur Ekliptik scheinbar eine Kreisbahn, eine Ellipse oder eine „Hin-und-her-Bewegung“.

Diese scheinbare Bewegung liefert den unmittelbaren Nachweis für die Bewegung der Erde um die Sonne. Sie konnte zu Zeiten von Kopernikus und Kepler aber wegen der damals zu geringen Genauigkeit nicht beobachtet werden.

Um die Entfernung eines nahen Sterns zu ermitteln, wird dieser von der Erdposition A und ein halbes Jahr später von der Position B aus angepeilt. Bezogen auf die Verbindungsgerade AB ergeben sich verschiedene Winkel α und β . Für deren Differenz erhält man $\beta - \alpha = 2 \cdot p$.

Der Winkel p heißt *jährliche Parallaxe* des Sterns.



Die jährliche Parallaxe lässt sich auch wie folgt interpretieren: Sie ist gleich dem Winkel, unter dem der Erdbahnradius von dem Stern aus gesehen wird.

Hier schließt sich die Definition der Entfernungseinheit 1 *Parsec* (Parallaxensekunde) an: 1 Parsec = 1 pc ist die Entfernung, aus der die große Halbachse der Erdbahn unter dem Winkel 1'' zu sehen ist.

Selbstverständlich wird im Unterricht auch die etwas anschaulichere Entfernungseinheit 1 *Lichtjahr* (1 Lj) verwendet, es gilt 1 pc = 3,26 Lj.

Zur Berechnung der Sternentfernung:

Es gilt $\frac{1 \text{ AE}}{r} = \tan p$, und wegen $p < 1''$ ist die Näherung $\tan p = p \cdot \frac{\pi}{180^\circ}$ zulässig.

Damit folgt für die Entfernung des Sterns zunächst $r = \frac{1 \text{ AE}}{p \cdot \frac{\pi}{180^\circ}}$ (r und p sind also indirekt

proportional). Durch Quotientenbildung mit $1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AE}}{1'' \cdot \frac{\pi}{180^\circ}}$ (vgl. Definition von 1 pc) ergibt

sich $\frac{r}{1 \text{ pc}} = \frac{1''}{p}$. Dies führt schließlich auf den Ausdruck $r = \frac{1''}{p} \cdot 1 \text{ pc}$.

Bei erdgebundenen Teleskopen liegt die Winkelauflösung höchstens bei ca. 0,01'', woraus sich eine maximale „Reichweite“ dieser Methode von etwa $100 \text{ pc} \approx 300 \text{ Lj}$ ergibt. Wegen der kleinen Werte von p ist das „Ausfiltern“ der jährlichen Parallaxe aus der Gesamtbewegung schwierig, die Eigenbewegung der Sterne ist meist um ein Vielfaches größer.

Ergänzung

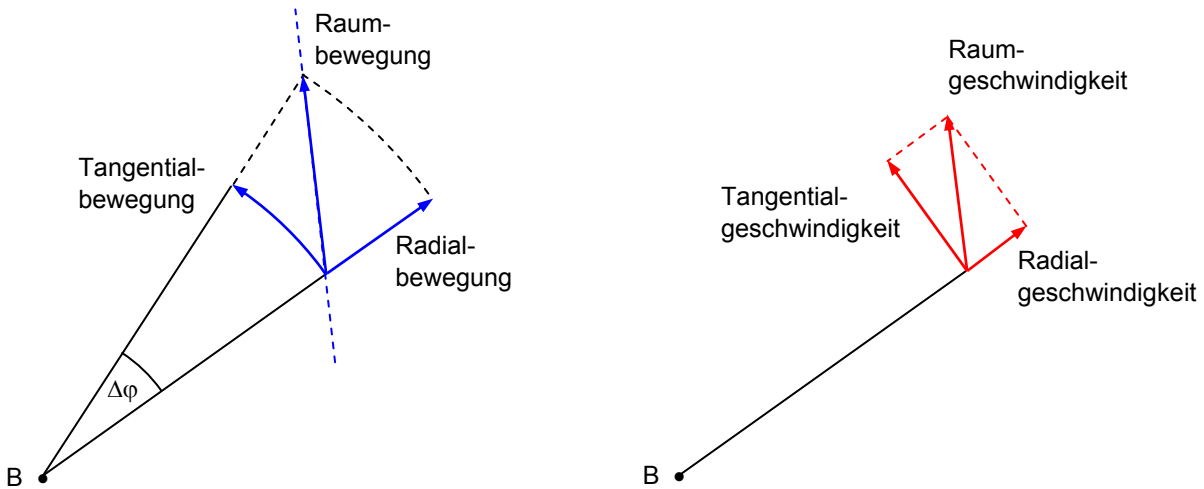
Terrestrisch konnten mit diesem Verfahren knapp 2 000 Parallaxen mit einem Fehler kleiner 20 % gemessen werden. Durch den Einsatz von Satelliten (zum Beispiel Hipparcos, 1989 gestartet, 37 Monate im Einsatz) ließen sich die Anzahl und die Genauigkeit der Ergebnisse deutlich steigern. Derzeit kann eine Winkelauflösung bis zu 0,001'' erzielt werden, was die Reichweite der Methode auf 1 kpc erhöht. Von den mit Hipparcos erfassten Parallaxen weisen über 33 000 einen Fehler kleiner 20 % auf, bei knapp 12 000 liegt der Fehler unter 10 %, 4 000 haben einen Fehler kleiner 5 % und 300 Parallaxen wurden sogar mit einem Fehler kleiner 1 % gemessen.

Quelle: Herrmann, „Die Milchstraße“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003

Beispiele:

- Die ersten Sternparallaxen konnten 1838 gemessen werden. So ermittelte Friedrich Wilhelm Bessel für den Stern 61 Cygni im Sternbild Schwan eine Parallaxe von 0,31''. Daraus ergibt sich eine Entfernung von $3,2 \text{ pc} = 10 \text{ Lj}$. Bessel verwendete für seine Messung ein von Fraunhofer angefertigtes Spezialfernrohr.
- Das Doppelsternsystem α Centauri wird in einem geschätzten Zeitraum von 1 Million Jahren von dem roten Zwergstern Proxima Centauri umrundet. Dieser liegt derzeit etwa 0,1 Lj näher an unserem Sonnensystem als α Centauri und ist somit der uns am nächsten gelegene Stern. Also besitzt er die größte jährliche Parallaxe. Sie beträgt $p = 0,772'' (\pm 0,0002'')$, was einer Entfernung von $1,295 (\pm 0,0004) \text{ pc}$ entspricht.

Die Raumbewegung von Sternen



Sterne bewegen sich in der Regel „schräg“ zum ruhend angenommenen Sonnensystem.

Für die Raumgeschwindigkeit v eines Sterns gilt gemäß Skizze $v = \sqrt{v_{\text{Tan}}^2 + v_{\text{Rad}}^2}$.

Die Eigenbewegung eines Sterns

Unter der *Eigenbewegung* μ eines Sterns versteht man seine Bewegung an der gedachten Himmelskugel in Bogensekunden pro Jahr. Es handelt sich dabei also um die Winkelgeschwindigkeit des Sterns relativ zum Sonnensystem.

Die Eigenbewegung $\mu = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ wird in Bogensekunden pro Jahr angegeben.

Beispiel: Mit $10,3'' \text{ a}^{-1}$ zeigt Barnards Stern die größte Eigenbewegung. In 180 Jahren verändert er seine Position um einen Vollmonddurchmesser.

Die Bestimmung der Eigenbewegung eines Sterns ist sehr aufwändig. Man muss hierzu die Positionsveränderung des Sterns aus im Zeitraum von Jahrzehnten gewonnenen Photographien ermitteln. Mit diesen Photographien wurde natürlich neben der Eigenbewegung auch die jährliche Parallaxe registriert. Hinzu kommen die Präzession und Nutation der Erdachse sowie die Lageveränderung unseres Sonnensystems gegenüber den Hintergrundsternen. Das Ausfiltern all dieser Störeffekte ist ausgesprochen schwierig.

Zur Berechnung der Tangentialgeschwindigkeit interpretiert man die Tangentialbewegung als Kreisbewegung mit dem Radius r . Nach Umrechnung von μ in das Bogenmaß $\hat{\mu}$ gilt dann $v_{\text{Tan}} = \hat{\mu} \cdot r$. Um auf die gängige Einheit kms^{-1} zu kommen, sind zusätzlich 1a in Sekunden und die Entfernung r in Kilometer umzurechnen.

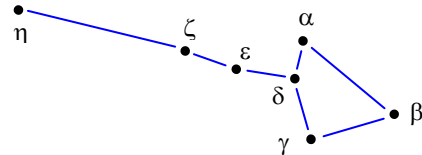
Beispiel: Der 42 Lj entfernte Stern Capella (α Aurigae, Hauptstern im Sternbild Fuhrmann) zeigt im Zeitraum von 20 Jahren eine Positionsveränderung von $8,72''$ gegenüber dem Sternhintergrund.

Seine Eigenbewegung beträgt $0,436'' a^{-1}$. Seine Tangentialgeschwindigkeit

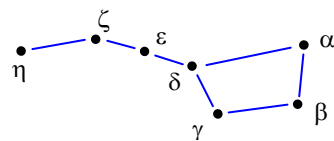
$$\text{errechnet sich zu } v_{\text{Tan}} = \frac{0,436 \cdot \pi}{3600 \cdot 180 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}} \cdot 42 \cdot 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} = 27 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Das folgende Beispiel soll zeigen, dass Sternbilder infolge der Eigenbewegung ihrer Sterne langfristig ihr Aussehen ändern.

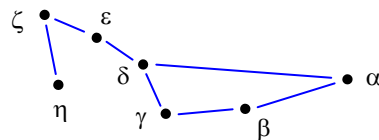
Das Sternbild Großer Bär vor 100 000 Jahren



heute



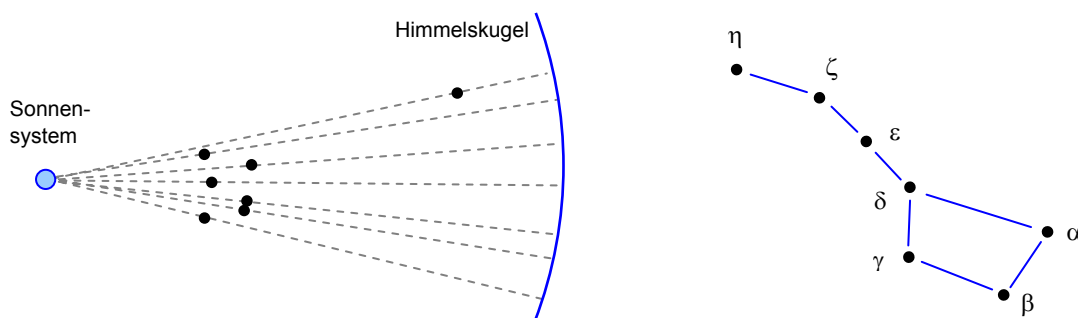
in 100 000 Jahren



Ergänzung

Die Sterne $\beta, \gamma, \delta, \epsilon$ und ζ UMa sind Mitglieder eines sogenannten *Bewegungshaufens*, dessen Mitglieder nur noch durch eine gemeinsame Raumgeschwindigkeit erkennbar sind. Es handelt sich praktisch um die Fragmente eines offenen Sternhaufens, der sich in Auflösung befindet. Die Zugehörigkeit zum Ursa-Major-Bewegungshaufen ist für über 70 Sterne nachgewiesen, darunter auch für Sterne wie Sirius (α CMa) und Menkalinan (β Aur), die ja zu ganz anderen Sternbildern gehören. Folglich muss sich die Sonne mitten in diesem Bewegungshaufen befinden, sie zählt aber nicht dazu.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der Vergleich der tatsächlichen räumlichen Struktur des Sternbilds Großer Bär mit seinem Anblick vom Sonnensystem aus.



Entfernungstabelle:

Stern	α	β	γ	δ	ϵ	ζ	η
Distanz in Lj	75	62	75	65	78	60	160

Doppler-Effekt und Radialgeschwindigkeit

Wenn auch nicht vom Namen her, so ist der *akustische Dopplereffekt* doch vielen Schülerinnen und Schülern bekannt, zum Beispiel aus Übertragungen von Formel-1-Rennen. Hierbei ist die Tonhöhenänderung eines schnell vorbeifahrenden Rennwagens gut zu hören ist.

Vorschläge zur experimentellen Demonstration des Doppler-Effekts:

- Eine Stimmgabel mit hoher Eigenfrequenz wird kräftig angeschlagen und ruckartig auf die Schülerinnen und Schüler zu bzw. von ihnen weg bewegt.
- Eine Stimpfpeife mit hohem Ton wird in das eine Ende eines ca. 2 m langen Schlauches gesteckt. Während man gleichzeitig in das freie Schlauchende bläst, bewegt man den Schlauch über dem Kopf so, dass die Pfeife eine horizontale Kreisbahn durchläuft.
- In einer Wellenwanne wird der Erreger für Kreiswellen mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig über das Wasser geführt.

Der *optische Doppler-Effekt* ist die wichtigste und manchmal einzige Informationsquelle, aus der sich Aussagen über die Radialbewegung astronomischer Objekte gewinnen lassen. Dabei macht es wegen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit keinen Unterschied, ob sich die Quelle Q oder der Beobachter B bewegt. Die Radialgeschwindigkeit erhält man aus der Dopplerverschiebung von Spektrallinien (je nach Objekt Absorptions- oder auch Emissionslinien).

Für Geschwindigkeiten $v \ll c$ (und damit für nahezu alle astronomischen Objekte) gilt die

$$\text{Näherung } \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm \frac{v}{c} .$$

λ : unverschobene Wellenlänge der Spektrallinie (Laborwellenlänge)

λ' : verschobene Wellenlänge der Spektrallinie

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$: Wellenlängenänderung (mit Vorzeichen)

v : Betrag der Relativgeschwindigkeit

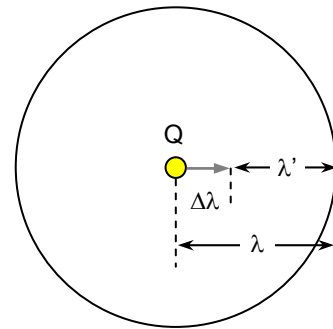
c : Lichtgeschwindigkeit

Herleitung der Näherungsformel:

In der Periodendauer T der elektromagnetischen Welle bewegt sich eine Wellenfront gerade um eine Wellenlänge λ weiter, während die Quelle die Weglänge $\Delta\lambda$ zurücklegt.

Für den Fall, dass sich die Quelle auf den Beobachter zu bewegt,

folgt $\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = -v \cdot T$, und mit $T = \frac{\lambda}{c}$ erhält man $\Delta\lambda = -\frac{v}{c} \cdot \lambda$.



Wenn sich die Quelle vom Beobachter weg bewegt, folgt entsprechend $\Delta\lambda = +\frac{v}{c} \cdot \lambda$.

B und Q bewegen sich voneinander weg, $\Delta\lambda > 0$
Rotverschiebung



Keine Relativbewegung zwischen B und Q



B und Q bewegen sich aufeinander zu, $\Delta\lambda < 0$
Blauverschiebung



Ergänzung

Die Entdeckung des Doppler-Effekts beruht auf einem kuriosen Irrtum. Den uns wohlbekannten akustischen Effekt hat Doppler noch nicht beobachtet (Pferdekutsche und Eisenbahn waren dafür noch zu langsam), sondern sagte ihn 1842 voraus. Als Beleg für den von ihm gefundenen Satz nannte er die Farbunterschiede der Komponenten in Doppelsternen. Die Ursache der Farbunterschiede sah Doppler nur in der Radialkomponente (bezogen auf die Richtung zur Erde) der Bahnbewegung. Die Unterschiede in den Farbschätzungen verschiedener Beobachter sollten die allmähliche Änderung der Radialbewegung in der Doppelsternbahn anzeigen. Die erforderlichen Bahngeschwindigkeiten von über $10^4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ hielt er für akzeptabel. Doppler wusste nicht, dass der Effekt die Farbe der Lichtquelle praktisch nicht ändert, weil das benachbarte Kontinuum für das verschobene nachrückt. Die richtige Interpretation des Doppler-Prinzips als eine im Linienspektrum zu findende Verschiebung gab Fizeau 1848, und die ersten Radialgeschwindigkeitsmessungen von Sternen versuchte W. Huggins 1868.

Der optische Doppler-Effekt findet unter anderem bei folgenden Vorhaben Anwendung:

- Bestimmung der Raumbewegung aus Eigenbewegung und Radialbewegung von Sternen bei bekannter Entfernung:
Führt man dies für Sterne in der näheren Umgebung der Sonne durch, so kann man aus ihrer räumlichen Verteilung und Bewegung auf die Eigenbewegung des Sonnensystems gegenüber der Umgebung schließen. Die Sonne bewegt sich mit ca. $16 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ in eine Richtung nahe dem Stern δ Herculis. Durch die Untersuchung der Verteilung und Bewegung auch weiter entfernter Sterne lässt sich ableiten, dass die Sonne mit ca. $250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ um das etwa 10 kpc entfernte galaktische Zentrum rotiert.
- Bestätigung der differentiellen Rotation der Saturnringe und der Sonne
- Bestimmung der Geschwindigkeit aufsteigender Granulen der Sonnenoberfläche:
 $\Delta\lambda \approx 0,01 \text{ nm}$ führt auf einige km s^{-1} .
- Identifizierung von spektroskopischen Doppelsternsystemen anhand der periodischen Verschiebung der Absorptionslinien:
Nachdem der Astronomie die Photoplatte zur Verfügung stand, entdeckte E. C. Pickering 1889 eine derartige Verschiebung im Spektrum von Mizar (ζ UMa) und erklärte sie durch die entgegengesetzte Bahnbewegung zweier Komponenten.
- Nachweis von Exoplaneten

Ein weiteres Beispiel:

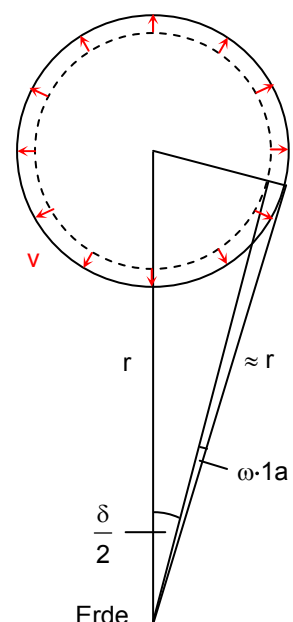
Im Sternbild Stier liegt der berühmte, expandierende Krabbennebel (M1 bzw. NGC 1952). Die Ausdehnung eines solchen Nebels „nach allen Seiten hin“ lässt sich am besten durch das Aufblasen eines Luftballons veranschaulichen.

Beim Blick auf das Zentrum ergibt sich für die Emissionslinien eine Verschiebung vom Betrag $|\Delta\lambda| = 4,83 \cdot 10^{-3} \lambda$.

Der scheinbare Durchmesser des Nebels beträgt ca. $6,8'$ und vergrößert sich um etwa $0,44''$ pro Jahr.

a) Die Expansionsgeschwindigkeit des Nebels errechnet sich zu

$$v = \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda} \cdot c = 1,45 \cdot 10^3 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \text{ Die von der Erde aus gesehene}$$



„Winkel-Expansionsgeschwindigkeit“ ergibt umgerechnet in das Bogenmaß

$\omega = 3,38 \cdot 10^{-14} \text{ s}^{-1}$. Daraus erhält man die Entfernung des Nebels zu

$$r = \frac{v}{\omega} = 4,3 \cdot 10^{16} \text{ km} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ pc} .$$

b) Für die Zeitdauer seit der Entstehung ergibt sich $t = \frac{6,8 \cdot 60''}{0,44''} \cdot 1\text{a} \approx 930 \text{ a}$.

Dies stimmt gut mit den Aufzeichnungen chinesischer Astronomen überein, die im Jahr 1054 an der entsprechenden Stelle im Sternbild Stier eine Supernova-Explosion beobachtet haben.

Ergänzung

Der Nebel gibt sowohl durch thermische als auch durch nicht-thermische Strahlung Energie ab. Die Leuchtkraft der roten Strahlungsfilamente (H_{α} -Strahlung) stammt hauptsächlich aus der damaligen Supernova-Explosion. Die Umsetzung in Strahlungsenergie erfolgt durch Wechselwirkung der Stoßfront der expandierenden Hülle mit interstellarem Gas (thermische Strahlung).

Der Krabben-Nebel (manchmal auch irreführend als Krebs-Nebel bezeichnet) ist der einzige Überrest einer Supernova-Explosion, bei dem sich auch die Wechselwirkung des Pulsars mit der Hülle direkt beobachten lässt. Durch das Magnetfeld des rotierenden Neutronensterns werden Elektronen in die expandierende Wolke getrieben und beschleunigt, die Rotationsenergie des Pulsars nimmt dabei ab. Die Elektronen bewegen sich auf spiralförmigen Bahnen und erzeugen Synchrotronstrahlung (bläuliches Leuchten, nicht-thermische Strahlung). Beim Zusammenstoß mit Teilchen der Hülle entsteht dann nochmals thermische Strahlung.

Zustandsgrößen

Um einen Stern vollständig charakterisieren zu können, bedarf es einer Reihe von physikalischen Größen, die generell als *Zustandsgrößen* bezeichnet werden:

- Masse
- Leuchtkraft
- Radius
- mittlere Dichte und Schwerebeschleunigung
- Oberflächentemperatur
- Spektralklasse bzw. Leuchtkraftklasse
- Rotationsgeschwindigkeit an der Sternoberfläche
- Magnetfeld
- chemische Zusammensetzung

Während einige von ihnen direkte Beobachtungsgrößen sind, werden andere indirekt aus Beobachtungen abgeleitet. Einige der Zustandsgrößen sind über mathematische Beziehungen miteinander verknüpft. Andere Beobachtungsgrößen wie zum Beispiel die scheinbare Helligkeit zählen nicht zu den Zustandsgrößen, weil sie von der Entfernung abhängen und damit primär nicht charakteristisch für den Stern sind.

Im Unterricht werden nicht alle oben aufgeführten Zustandsgrößen behandelt. Man wird auch den Begriff Zustandsgröße eher beiläufig und selbstverständlich verwenden, ohne ihn gesondert zu thematisieren.

Sternhelligkeiten

Die scheinbare Helligkeit

Zu Sternhelligkeiten und -farben bieten sich folgende Beobachtungsaufträge an:

- Ordnen der Sterne eines bekannten Sternbildes nach dem Helligkeitseindruck. Diese Einstufung wird später im Unterricht mit den Angaben aus einem Sternatlas verglichen.
- Einer Reihe von vorgegebenen Sternen ist jeweils ein Farbeindruck zuzuordnen. Man erhält zum Beispiel:

Rigel	β Ori	bläulich-weiß
Sirius	α CMa	
Sonne	α Aur	gelblich
Capella	α UMi	
Polaris		
Aldebaran	α Tau	rötlich
Beteigeuze	α Ori	

Sternfarben lassen sich mit einfachen Mitteln auch photographisch zeigen. Mit einer Kamera, die eine Langzeitbelichtung zulässt, nimmt man bei unscharfer Einstellung der Optik (dies verhindert, dass die hellen Sterne wegen lokaler Überbelichtung alle gleich weiß erscheinen) einen geeigneten Himmelsausschnitt, zum Beispiel das Sternbild Orion, auf. Die Kamera muss dabei feststehend montiert sein. Bei maximaler Blendenöffnung belichtet man für ca. 10 Minuten und erhält farbige Sternspuren.

Die *scheinbare Helligkeit* m eines Sterns ist die älteste astronomische Messgröße. Bereits Hipparch von Nikaia (um 150 v. Chr.) katalogisierte Sternhelligkeiten. Er ordnete den hellsten Sternen die „1. Größe“ zu und den mit bloßem Auge gerade noch sichtbaren Sternen die „6. Größe“. Der Begriff „Größe“ rührt daher, dass man im Altertum die Helligkeit eines Sterns als Indiz für seine Größe ansah. Dieses nicht unbedingt zweckmäßige Größenklassensystem wurde auch nach der Erfindung des Fernrohrs beibehalten und entsprechend angepasst.

Die scheinbare Helligkeit eines Sterns korreliert mit dessen Strahlungsflussdichte E , also der am Beobachtungsort pro Flächeneinheit bei senkrechter Einstrahlung auftreffenden Strahlungsleistung. Ist r die Entfernung des Sterns und L seine Leuchtkraft (also die gesamte, durch elektromagnetische Strahlung emittierte Leistung), so gilt bei räumlich gleichmäßiger

$$\text{Abstrahlung } E = \frac{L}{4\pi r^2}.$$

Von den Astronomen wird E als Bestrahlungsstärke bezeichnet und ist im Fall der Sonne die Solarkonstante S . In der Literatur wird für E auch häufig der Begriff *Intensität* verwendet. Dies ist zwar nicht ganz konsequent, aber für den Bereich Schule sinnvoll.

Da die Angaben zu scheinbaren Helligkeiten ursprünglich auf subjektiven Schätzungen basierten, haben sich je nach Beobachter deutliche Differenzen gezeigt. Erst Mitte des 19. Jahrhunderts konnte eine Vereinheitlichung des Größenklassensystems erreicht werden. Bei dieser Vereinheitlichung geht wesentlich mit ein, dass unser Gehirn in Bezug auf Sinneseindrücke nicht linear arbeitet. So wertet es eine Verdopplung der Bestrahlungsstärke nicht als Helligkeitsverdopplung. Vielmehr gilt das von Weber und Fechner 1859 gefundene psychophysische Grundgesetz, das den Zusammenhang zwischen dem „physikalischen Reiz“ (hier E) und der dadurch hervorgerufenen „Sinnesempfindung“ (hier m) aufzeigt: $m \sim \log(E)$ bzw. $m = c \cdot \log(E)$ mit geeigneter Konstante c .

Bereits kurz zuvor hatte der Astronom Pogson für den Zusammenhang von zwei verschiedenen Bestrahlungsstärken E_1 und E_2 mit den entsprechenden Sinnesempfindungen m_1 und m_2 den Ausdruck $m_1 - m_2 = c \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$ vorgeschlagen und damit einen Spezialfall des psychophysischen Grundgesetzes formuliert.

Für die Praxis ist Proportionalitätsfaktor c so zu wählen, dass er einen möglichst einfachen Wert hat und sich die Schrittweite der resultierenden Helligkeitsskala ungefähr an das historische Größenklassensystem anpasst. Beim Vergleich eines Sterns 1. Größe ($m_1 = 1$) mit einem Stern 6. Größe ($m_2 = 6$) liefern die zugehörigen Messungen $E_1 : E_2 = 100 : 1$, woraus $c = -2,5$ folgt. Für die Differenz zweier scheinbarer Helligkeiten erhält man so den Ausdruck

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right),$$

der als Definitionsgleichung für ein Größenklassensystem allgemein anerkannt wurde.

Der Grund für das Minuszeichen liegt darin, dass die historische Skala entgegengesetzt zur Beleuchtungsstärke „orientiert“ ist: Je größer die Beleuchtungsstärke eines Sterns ist, desto kleiner wird die Zahl, die seine Helligkeit angibt.

Die scheinbare Helligkeit sollte im Unterricht immer als benennungslose Zahl angegeben werden, auch wenn in der Literatur bisweilen die Einheit „Magnitude“ zu finden ist (meist in der Form $m = 1,6 \text{ mag}$ bzw. $m = 1,6^m$).

Die zur Zeit erfassbaren Helligkeiten reichen von $m = -26,8$ (Sonne) bis zu $m \approx 28$ (Quelle: Sterne und Weltraum 6/1992). Bei $m \approx 28$ ist die Intensität der auf der Erde empfangenen Strahlung so groß wie die von einer Kerzenflamme in 300 000 km Entfernung.

Für Berechnungen ist die folgende Umformung vorteilhaft:

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{\frac{m_1 - m_2}{-2,5}} = 10^{\frac{2}{5} \cdot (m_2 - m_1)} = q^{(m_2 - m_1)} \quad \text{mit } q = \sqrt[5]{100} = 2,512.$$

Daran lässt sich u. a. ablesen, dass einem Helligkeitsunterschied $\Delta m = 2,5$ (z. B. Aldebaran mit $m_2 \approx 1$ und Sirius mit $m_1 \approx -1,5$) ein Faktor 10 bei den Intensitäten entspricht.

Ergänzungen

- Die logarithmische Verarbeitung von Sinneseindrücken durch unser Gehirn gilt natürlich auch für alle weiteren Wahrnehmungsbereiche. Ein bekanntes Beispiel ist Lautstärkeempfindung von Tönen.
- Für eine Größenklassenskala muss neben der Schrittweite auch ein Bezugspunkt festgelegt werden. Pogson wählte aufgrund der für die Nordhalbkugel günstigen Lage den Polarstern und ordnete ihm die scheinbare Helligkeit 2,12 zu. Als dieser sich jedoch als schwach veränderlich erwies, wurde die sogenannte „Internationale Polsequenz“, ausgewählte Sterne von $m = 2$ bis $m = 17$ in der Umgebung des Himmelsnordpols, für diesen Zweck verwendet. Heute sind durch die Anwendung photoelektrischer Methoden die Helligkeiten von einigen hundert Sternen mit einer Genauigkeit von $\Delta m = \pm 0,01$ bekannt, so dass man nicht mehr auf die Polsequenz zurückgreifen muss.
- Ursprünglich waren visuelle Beobachtungen die alleinige Grundlage für scheinbare Helligkeiten. Als man versuchte, Sternhelligkeiten auch aus Photographien zu ermitteln, zeigten sich zumindest für bestimmte Sterne Unterschiede zur visuellen Einstufung. Das liegt daran, dass die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges nicht mit der ebenfalls wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit der photographischen Schicht übereinstimmt.

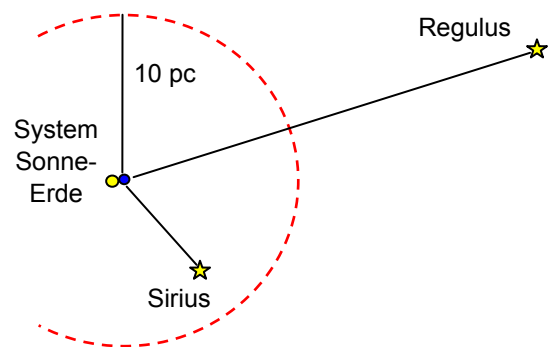
Mittlerweile haben sich für Helligkeitsbestimmungen Verfahren etabliert, die aus einer Kombination von Messungen in mehreren Spektralbereichen mit genau definierter spektraler Empfindlichkeit bestehen. Weit verbreitet ist zum Beispiel das UBVRI-System (für Ultraviolett, Blau, Visuell, Rot, Infrarot).

Quelle und weiterführende Literatur:

Weigert, Wendker, Wisotzki „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005

Die absolute Helligkeit

Die Bestrahlungsstärke und damit die scheinbare Helligkeit eines Sterns hängt natürlich von seiner Entfernung von der Erde ab. Um einen von diesem Abstand unabhängigen Helligkeitsvergleich zu ermöglichen, rückt man alle Sterne in Gedanken in die willkürlich gewählte „Norm“-Entfernung $10 \text{ pc} = 32,6 \text{ Lj}$. Die scheinbare Helligkeit eines Sterns in dieser Distanz wird als seine *absolute Helligkeit* M bezeichnet. Sie ist ein Maß für die *Leuchtkraft* (gesamte Strahlungsleistung) L des Sterns.



Aus der Graphik ist unmittelbar abzulesen:

- $m < M$ genau dann, wenn $r < 10 \text{ pc}$,
- $m = M$ genau dann, wenn $r = 10 \text{ pc}$,
- $m > M$ genau dann, wenn $r > 10 \text{ pc}$.

Die Beziehung $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$ lässt sich einfach auf die absolute Helligkeit umrechnen, indem man unter Verwendung von $E = \frac{L}{4\pi r^2}$ auf die Intensitäten in der Entfernung 10 pc übergeht.

$$\text{Man erhält } -2,5 \cdot \lg \frac{\frac{L_1}{4\pi \cdot (10 \text{ pc})^2}}{\frac{L_2}{4\pi (10 \text{ pc})^2}} = -2,5 \cdot \lg \frac{L_1}{L_2} = M_1 - M_2 ,$$

$$\text{sowie nach Umformung } \frac{L_1}{L_2} = q^{M_2 - M_1} = 10^{0,4 \cdot (M_2 - M_1)} \text{ mit } q = \sqrt[5]{100} = 2,512 .$$

Die Beziehung $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$ führt auch auf den Vergleich der scheinbaren Helligkeit eines Sterns mit seiner absoluten Helligkeit: Man wählt für E_1 die Intensität in der tatsächlichen Entfernung r und für E_2 die in der Entfernung 10 pc . Entsprechend ist m_1 allgemein durch m und m_2 durch die absolute Helligkeit M zu ersetzen.

Es folgt $m - M = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{\frac{L}{4\pi r^2}}{\frac{L}{4\pi(10 \text{ pc})^2}} \right)$, sowie nach Vereinfachung

$$m - M = 5 \cdot \lg \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right) \quad (*) .$$

$m - M$ ist ein Maß für die Entfernung des Sterns von der Erde und heißt *Entfernungsmodul*.

Die Beziehung (*) kann, falls m und r bekannt sind, zur Berechnung von M verwendet werden.

Beispiele (vgl. Graphik auf der vorhergehenden Seite):

Sonne: $m = -26,8$; $r = 1 \text{ AE} = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ pc} \Rightarrow M = 4,8$

Sirius: $m = -1,46$; $r = 2,7 \text{ pc} \Rightarrow M = 1,4$

Regulus: $m = 1,36$; $r = 26 \text{ pc} \Rightarrow M = -0,7$

Die eigentliche Bedeutung von (*) besteht allerdings darin, bei bekannter scheinbarer und absoluter Helligkeit eines Sterns seine Entfernung r zu ermitteln.

(\rightarrow Photometrische Entfernungsbestimmung, S. 73)

Nicht nur bei den Leuchtkräften zeigt sich, dass die reinen Zahlenwerte wenig Aussagekraft haben. Wesentlich anschaulicher ist es, für die Leuchtkraft L , aber auch für die Masse M , die Oberflächentemperatur T und den Radius R eines Sterns die Angaben hierzu auf die entsprechenden Daten der Sonne zu beziehen, also Relativangaben zu benutzen. Häufig werden dabei die jeweiligen Größen der Sonne mit dem Symbol \odot indiziert. Für Helligkeiten sind Relativangaben allerdings nicht sinnvoll.

Sonne: Leuchtkraft L_{\odot} , Radius R_{\odot} , usw.

Stern relativ: relative Leuchtkraft $\frac{L}{L_{\odot}} = L^*$, relativer Radius $\frac{R}{R_{\odot}} = R^*$, usw.

Die Schreibweise L^* , R^* usw. gestattet eine übersichtliche Darstellung der Ausdrücke und wird gerne in Schulbüchern verwendet. Allgemein üblich ist sie jedoch nicht.

Mit den absoluten Helligkeiten M bzw. M_{\odot} erhält man $M - M_{\odot} = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)$

beziehungsweise $L^* = q^{(M_{\odot} - M)} = 10^{0,4 \cdot (M_{\odot} - M)}$.

Beispiel: Sirius

$$L^* = 10^{0,4 \cdot (M_{\odot} - M)} = 10^{0,4 \cdot (4,8 - 1,4)} = 23 \quad \text{bzw.} \quad L = 23 \cdot L_{\odot} .$$

Sternradien

In den meisten Fällen lassen sich Sternradien nicht direkt bestimmen. Bei einigermaßen genau bekannter Leuchtkraft und Temperatur eines Sterns lässt sich sein Radius jedoch mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes $L = \sigma \cdot 4\pi R^2 \cdot T^4$ näherungsweise bestimmen. Mit der folgenden Überlegung erhält man den Sternradius gleich in Vielfachen des Sonnenradius:

$$\left. \begin{array}{l} L = \sigma \cdot 4\pi R^2 \cdot T^4 \\ L_{\odot} = \sigma \cdot 4\pi R_{\odot}^2 \cdot T_{\odot}^4 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4 \Rightarrow R^* = \frac{\sqrt{L^*}}{(T^*)^2}$$

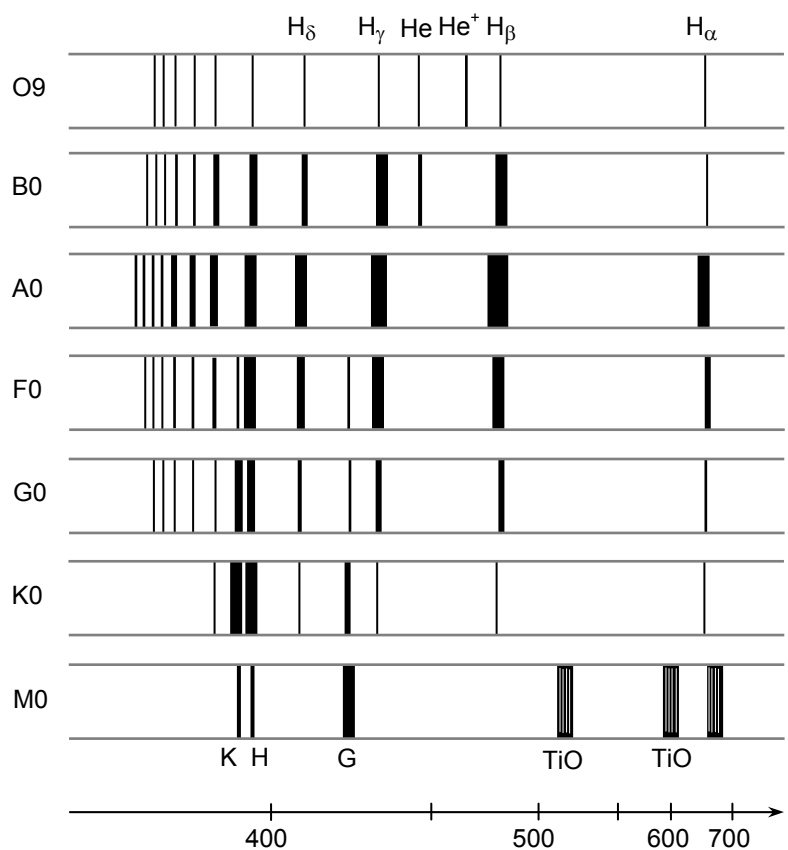
Beispiel Sirius: Mit $T = 9,7 \cdot 10^3 \text{ K}$ und $L = 23 \cdot L_{\odot}$ folgt $R^* = 1,7$ bzw. $R = 1,7 \cdot R_{\odot}$.

Spektralklassen

Für ihre Einführung betrachtet man zweckmäßigerweise eine Reihe von Sternspektren, die eventuell bereits nach Spektralklassen geordnet sind. Dies lässt sich mit einer prägnanten Wiederholung zur spektralen Intensitätsverteilung eines Schwarzen Strahlers und deren Abhängigkeit von der Temperatur verbinden. Auch die Entstehung von Emissions- und Absorptionslinien wird man ganz kurz wiederholen und dabei insbesondere auf die Balmer-Serie und die H_{α} -Linie eingehen.

Die betrachteten Spektren weisen mehr oder weniger deutliche Unterschiede hinsichtlich der Absorptionslinien auf. Die Stärke der Linien hängt von der relativen Anzahl der jeweils angeregten (ggf. auch ionisierten) Atome ab und ist somit von der Temperatur abhängig.

Die nebenstehende schematische Darstellung zeigt die Spektren nach ihren wesentlichen Unterschieden und mit von unten nach oben steigender Oberflächentemperatur geordnet. Die überzeichnet dargestellte Breite der Linien ist ein Maß für ihre Stärke.



(Graphik nach Gondolatsch, Groschopf, Zimmermann)

λ in nm

Die Darstellung beinhaltet, dass man die folgenden Spektralklassen (Spektraltypen) unterscheidet:

O – B – A – F – G – K – M

Merkspruch der Harvard-Studenten: „Oh, be a fine girl, kiss me“.

Eines wird schnell klar: Offenbar benutzen Astronomen furchtbar gern komische Merksätze.

Die Spektralklassen sind zusätzlich dezimal von 0 bis 9 unterteilt. Die Klasse O beginnt erst bei O3, die Klasse M endet etwa bei M8. Die Klassen O bis A werden aus historischen Gründen als „frühe“ und K bis M als „späte“ Spektralklassen bezeichnet.

Ergänzungen

- a) Die eigenartige Bezeichnungsweise der Spektralklassen resultiert aus der systematischen Ordnung von Sternspektren durch Pickering und seine zahlreichen Assistentinnen (genannt Pickerings Harem). Die Spektren wurden nach der Stärke der Wasserstofflinien mit den Buchstaben A, B, C, usw. versehen. Später wurden einige nicht charakteristische Typen aussortiert und der Rest nach abnehmender Oberflächentemperatur geordnet. Schließlich blieb die Hauptfolge O-B-A-F-G-K-M übrig. Eine der Mitarbeiterinnen, Miss Cannon, hat insgesamt mehr als 300 000 Spektren analysiert. Dabei entwickelte sie eine bemerkenswerte Routine: Für drei Spektren benötigte sie kaum mehr als etwa eine Minute.
- b) Neben der Hauptfolge gibt es die bei K abzweigenden Nebenfolgen C (Kohlenstoffsterne, frühere Bezeichnung R und N) und S (Sterne, bei denen TiO durch ZrO ersetzt ist). In der Klasse W sind die sogenannten Wolf-Rayet-Sterne zusammengefasst. Diese Klasse kommt in der Hauptfolge noch vor den O-Sternen.

Übersicht über die Spektralklassen mit den wichtigsten Eigenschaften

Spektral-klasse	Oberflächentemperatur in K	Typische Vertreter	Farbeindruck	Charakteristik
O	40 000 – 25 000	ξ Puppis, O5	blau	starke Linien von He und He ⁺ , Wasserstofflinien schwach, Gesamtzahl der Absorptionslinien gering
B	25 000 – 10 000	Spica, B1 Regulus, B7 Rigel, B8	bläulich-weiß	starke Absorptionslinien von He, He ⁺ -Linien deutlich schwächer, Balmer-Linien mäßig
A	10 000 – 7 500	Wega, A0 Sirius, A1 Deneb, A2	weiß	Balmer-Linien am stärksten, Linien von Fe ⁺ und Ca ⁺ kommen auf
F	7 500 – 6 000	Procyon, F5 Polaris, F7	weiß-gelblich	H-Linien abnehmend, Ca ⁺ nimmt zu, Linien ionisierter und neutraler Metalle, feine Linien von Fe, Ti, Mg
G	6 000 – 5 000	Sonne, G2 Capella, G8	gelb	Ca ⁺ sehr stark, Balmer-Linien weiter abnehmend, neutrale Metalle, erstes Auftreten von Banden von CN- und CH-Molekülen
K	5 000 – 3 500	Arctur, K1 Aldebaran, K5	orange	Ca ⁺ anfangs maximal, neutrale Metalle und Moleküle stark, Balmer-Linien sehr schwach
M	3 500 – 3 000	Antares, M1 Beteigeuze, M2	rot	TiO-Banden sehr stark, neutrale Metalle mit niedriger Anregungsenergie, besonders neutrales Ca

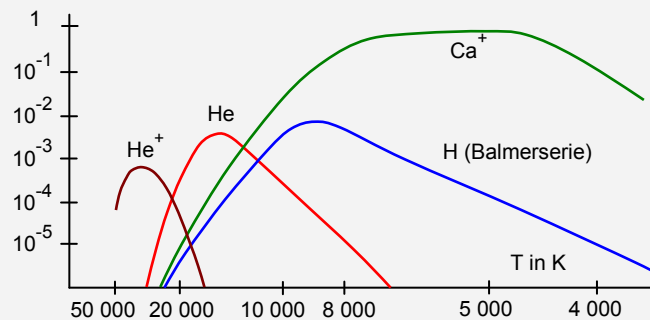
Die in der Tabelle dargestellten Zusammenhänge sind grundsätzlicher Art und keineswegs vollständig. Sie machen jedoch deutlich, dass die Spektralsequenz eine Aussage über die Oberflächentemperatur möglich macht. Die Darstellung dient einer möglichen Vertiefung des Verständnisses für atomphysikalische Vorgänge auf Sternoberflächen. Aus Zeitgründen kann man im Unterricht höchstens andeutungsweise darauf eingehen.

Ergänzungen

- a) Strahlung emittierende oder absorbierende Atome und Ionen beziehen ihre Anregungsenergie zum großen Teil aus Stößen untereinander. Je heißer die Sternoberfläche ist, desto mehr Energie haben die stoßenden Atome und umso höhere Anregungsstufen können erreicht werden. Auch bei der Anregung durch Quanten gilt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz: Eine höhere Temperatur liefert mehr energiereiche Quanten und damit umso stärker besetzte hohe Anregungsstufen.
- b) Für das Entstehen von Absorptionslinien muss das entsprechende untere Energieniveau der absorbierenden Atome bei hinreichend vielen Atomen besetzt sein, für das Entstehen von Emissionslinien das obere (erfordert mehr Energiezufuhr). Deshalb sind bei Sternen (fast) nur Absorptionslinien zu beobachten. Emissionslinien stammen meist aus ausgedehnten dünnen Gashüllen. Bei Resonanzabsorption findet zwar wieder eine Emission statt, aber in alle Raumrichtungen, so dass die Linien dunkel erscheinen.
- c) Für Wasserstoff bzw. Helium beträgt die notwendige Anregungsenergie aus dem Grundzustand zum ersten angeregten Niveau ca. 10 eV bzw. 20 eV. Die Ionisierungsenergien liegen bei ca. 14 eV bzw. 25 eV. Für beide Elemente liefern Übergänge zum oder vom Grundzustand also weder Emissions- noch Absorptionslinien im sichtbaren Spektralbereich, sondern im fernen Ultraviolett. Die Energien der angeregten Niveaus liegen aber näher beisammen, so dass Übergänge zwischen ihnen Linien im sichtbaren Bereich liefern. Dazu ist aber notwendig, dass ausreichend viele Atome mindestens im ersten angeregten Niveau vorliegen. Das macht verständlich, warum erst bei sehr heißen Sternen ($T \approx 25 \cdot 10^3$ K) Linien von neutralem Helium oder gar einfach ionisiertem Helium (He^+) auftreten. Dagegen sind Wasserstofflinien bei sehr heißen Sternen kaum ausgeprägt, da bei ihnen der Wasserstoff bereits zu einem großen Teil in ionisierter Form vorliegt und die Wahrscheinlichkeit zu Rekombinationen sehr gering ist. Bei Sterntypen mit zusehends niedrigerer Oberflächentemperatur treten die Heliumlinien immer mehr zurück und die Wasserstofflinien der Balmerreihe erreichen beim Spektraltyp A ihr Intensitätsmaximum.
- d) Für höhere Elemente gilt allgemein, dass Wechselwirkungen eigentlich nur mit der äußersten Elektronenschale auftreten. Die Anregungs- und Ionisierungsenergien der Außenschale sind dabei insbesondere für Metalle (und hier speziell für die der 1. und 2. Gruppe des Periodensystems) in der Regel niedriger als für Wasserstoff. Das erklärt, warum bei Sternen mit noch niedrigerer Oberflächentemperatur die Wasserstofflinien wieder schwächer werden (Energie zur Anregung des 10 eV-Niveaus wird zu gering), die Linien von Metallen aber immer stärker hervortreten. Wegen des komplizierteren Aufbaus der Atome der höheren Elemente liefert ein Metall oft eine Vielzahl von Linien im Spektrum, so dass für kühlere Sterne die Zahl der Absorptionslinien stark zunimmt (bei der Sonne einige 100 000). Bei Sternen höherer Oberflächentemperaturen dagegen haben die Metalle weitgehend die Elektronen der Außenschale verloren, während die Anregungsenergien aus inneren Elektronenschalen (meist) noch viel höher sind als bei Helium. Nur bei sehr hohen Temperaturen, wie z. B. in der Korona der Sonne mit ca. 10^6 K, treten zum Beispiel Linien von 13-fach ionisiertem Eisen auf.
- e) In Molekülen sind die Atome mit Energien von höchstens einigen eV aneinander gebunden, sie können also nur bei relativ niedrigen Oberflächentemperaturen (ca. 4 000 K) existieren. Die Atome eines Moleküls beeinflussen sich gegenseitig, so dass sich die Energieniveaus der Atome insgesamt in Gruppen vieler eng benachbarter Energiestufen aufspalten. Entsprechend enthält das absorbierte Licht Gruppen vieler eng benachbarter Linien (Banden). Bei kühlen Sternen sind daher weite Bereiche gerade im roten Spektralbereich durch Absorptionslinien „zugedeckt“, die spektrale Energieverteilung gehorcht keinesfalls mehr den Gesetzen der Schwarzkörperstrahlung.

Unter Berücksichtigung dieser Punkte werden das Aussehen und die Unterschiede der Spektren der einzelnen Spektralklassen besser verständlich. Insbesondere wird auch plausibel, wodurch und warum sich die Spektren zweier Sterne gleicher chemischer Zusammensetzung unterscheiden (alle Hauptreihensterne und die Hüllen der Riesensterne bestehen nämlich zu etwa 70 % aus Wasserstoff, zu 25 % bis 30 % aus Helium und zu 2 % bis 3 % aus höheren Elementen).

Die nebenstehende Graphik zeigt für einige Atome und Ionen die Besetzungszahl der Ausgangsniveaus für Absorptionslinien im Verhältnis zur Gesamtzahl der jeweiligen Atome bzw. Ionen in Abhängigkeit von der Temperatur.



- f) Ein zusätzlicher Effekt ist die Druckverbreiterung von Spektrallinien, bzw. deren Fehlen: Ein Hauptreihenstern der Spektralklasse K oder M hat eine relativ dichte Atmosphäre, so dass wegen der gegenseitigen Beeinflussung der Atome die Energieniveaus nicht so eindeutig bestimmt sind wie bei einem ungestörten Atom. Die Niveaus haben, über alle Atome gemittelt, eine gewisse „Breite“, entsprechend auch die Energien des emittierten beziehungsweise absorbierten Lichts. Riesensterne dieser Spektralklassen haben aber eine extrem dünne Atmosphäre, so dass diese Verbreiterung der Spektrallinien wegfällt. An dem Auftreten sehr scharfer (feiner) Spektrallinien bei späten Spektralklassen erkennt man also, dass es sich um einen „Riesensterne“ handelt. Hierauf wird man im Unterricht nicht eingehen.

Quellen und weiterführende Literatur:

Gondolatsch, Steinacker, Zimmermann, „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990

Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren für viele Sterne die Spektralklassen und die trigonometrischen Parallaxen und somit die absoluten Helligkeiten bekannt. Ohne zu ahnen, auf welches Ergebnis es führen könnte, gingen E. Hertzsprung 1911 und H. N. Russell 1913 unabhängig voneinander der Frage nach, ob sich bei den bekannten Sternen beliebige Kombinationen von Spektraltyp und absoluter Helligkeit zeigen. Ihre statistischen Untersuchungen führten auf das wohl wichtigste Zustandsdiagramm der Astrophysik.

Der historischen Entwicklung folgend wird für ein *Hertzsprung-Russell-Diagramm* (HRD) der Spektraltyp in der Reihenfolge O bis M von links nach rechts angetragen. Die absolute Helligkeit wird mit kleiner werdenden Zahlenwerten nach oben angetragen.

Die folgenden Tabellen enthalten Daten zur Erstellung eines HRDs.

Sonnennahe Sterne bis 5 pc

Stern	Spektraltyp	M
Proxima Cen	M5	15,5
α Cen A	G2	4,37
β Cen B	K0	5,71
Barnards Stern	M5	13,2
Wolf 359	M8	16,7
BD +36 ^o 2147	M2	10,5
L 726-8 A	M6	15,5
Sirius A	A1	1,42
Sirius B	A	11,2
Ross 154	M5	13,1
Ross 248	M6	14,8
ϵ Eri	K2	6,14
Ross 128	M5	13,5
61 Cyg A	K5	7,56
61 Cyg B	K7	8,37
ϵ Ind	K5	7,00
BD +43 ^o 44 A	M1	10,4
+43 ^o 44 B	M6	13,4
L 789-6	M7	14,5
Prokyon A	F5	2,64
Prokyon B	F	13,0
BD +59 ^o 1915 A	M4	11,2
+59 ^o 1915 B	M5	11,9
CD -36 ^o 15693	M2	9,58
τ Cet	G8	5,72

Stern	Spektraltyp	M
BD +5 ^o 1668	M5	11,9
L 725-32	M5	14,1
CD -39 ^o 14192	M0	8,74
Kapteyns Stern	M0	10,9
Krüger 60 A	M3	11,9
Krüger 60 B	M5	13,3
Ross 614 A	M7	13,1
BD -12 ^o 4523	M5	12,1
Van Maanens Stern	G	14,2
Wolf 424 A	M6	15,0
CD -37 ^o 15492	M4	10,3
L 1159-16	M8	14,0
BD +50 ^o 1725	K7	8,32
CD -46 ^o 11540	M4	11,0
G 158-27	M	15,4
CD -49 ^o 13515	M1	10,3
CD -44 ^o 13515	M5	12,6
BD +68 ^o 946	M3,5	10,8
BD -15 ^o 6290	M5	11,8
σ^2 Eri A	K1	6,01
σ^2 Eri B	A	11,1
σ^2 Eri C	M4	12,8
BD +20 ^o 2465	M4,5	11,0
70 Oph A	K0	5,76
BD +43 ^o 4305	M5	11,7

Nach Krautter u. a., „Meyers Handbuch Weltall“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich 1994

Die hellsten in Mitteleuropa sichtbaren Sterne

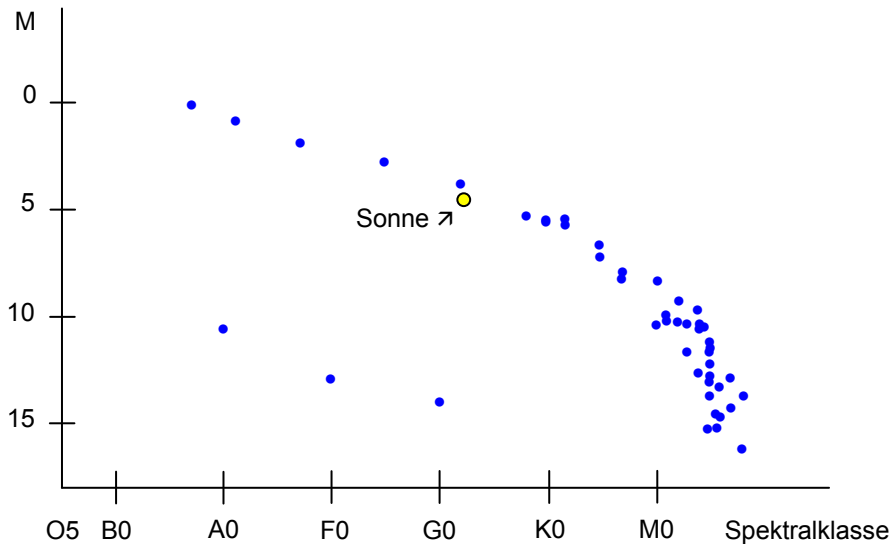
Stern	m	Spektral- typ	M	
Sonne	-26,7	G2	4,85	
α Cma	Sirius	-1,5	A1	1,4
α Boo	Arctur	-0,1	K2	-0,3
α Lyr	Wega	0,0	A0	0,5
α Aur	Capella	0,1	G6	-0,5
β Ori	Rigel	0,1	B8	-7,1
α CMi	Procyon	0,4	F5	2,7
α Ori	Beteigeuze	0,4v	M2	-5,6
α Aql	Atair	0,8	A7	2,2
α Tau A	Aldebaran	0,9v	K5	-0,2
α Sco	Antares	0,9v	M1	-4,6

Stern	m	Spektral- typ	M	
α Vir	Spica	0,9	B1	-3,6
α PsA	Fomalhaut	1,2	A3	1,5
β Gem	Pollux	1,2	K0	0,7
α Cyg	Deneb	1,3	A2	-7,1
α Leo	Regulus	1,4	B7	-0,7
α Gem A	Castor A	2,0	A1	1,1
α Gem B	Castor B	2,8	A5	1,9
λ Sco		1,6	B1	-3,6
γ Ori	Bellatrix	1,6	B2	-3,6
β Tau		1,6	B7	-1,6
ϵ CMa		1,5	B2	-4,8

Nach Gondolatsch u. a., „Grundkurs Astronomie“, Klett, Stuttgart 1990

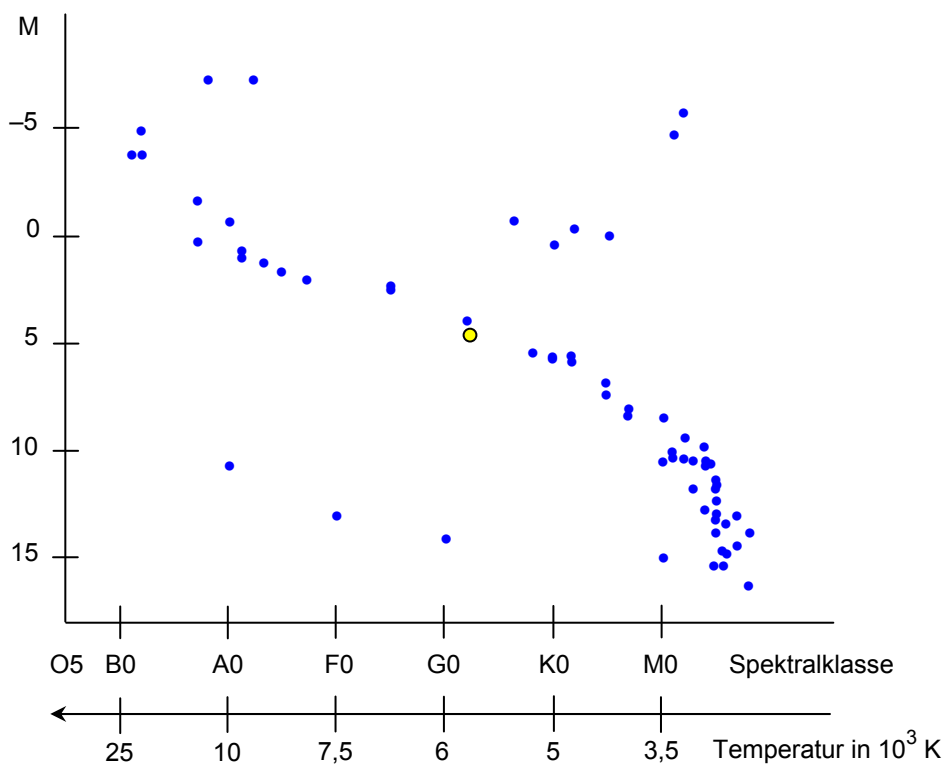
Es ist sinnvoll, im Unterricht mit einem HRD der sonnennahen Sterne zu beginnen. Dabei empfiehlt sich, zeitsparend mit einem fertigen Diagramm zu arbeiten. Freilich ist es auch denkbar, dass die Schülerinnen und Schüler unter Verwendung der obigen Tabelle selbst ein HRD erstellen.

Hertzsprung-Russell-Diagramm der sonnennahen Sterne



Obwohl die aufgelisteten Sterne nur eine spezielle Auswahl aus der Gesamtheit aller Sterne darstellen, lässt sich gut erkennen, dass das HRD nicht beliebig mit Bildpunkten von Sternen (einfacher: „mit Sternen“) besetzt ist. Die meisten Sterne finden sich in einem relativ schmalen, von links oben nach rechts unten verlaufenden Streifen, der als *Hauptreihe* bezeichnet wird. In diesem Streifen liegt auch unsere Sonne. Außerdem zeichnet sich links unten ein zweiter, deutlich weniger besetzter Bereich ab.

Nimmt man in das Diagramm zusätzlich weiter entfernte, helle Sterne auf, werden zwei weitere „Besetzungsbereiche“, auch Äste genannt, erkennbar.



Die relative Besetzung der angedeuteten Bereiche kann je nach Auswahlkriterium der Sterne deutlich variieren. So sind zum Beispiel in einem HRD der weiter entfernten Sterne jene mit geringer Leuchtkraft zu wenig repräsentiert, da sie entweder schon gar nicht mehr beobachtet oder nicht mehr einer Spektralklasse zugeordnet werden können (dies ist zuverlässig nur bis ca. $m = 14$ möglich). Andererseits bietet die Beschränkung von Hertzsprung-Russell-Diagrammen auf bestimmte Sterngruppen die Möglichkeit, auf physikalische Unterschiede zwischen den Gruppen aufmerksam zu werden.

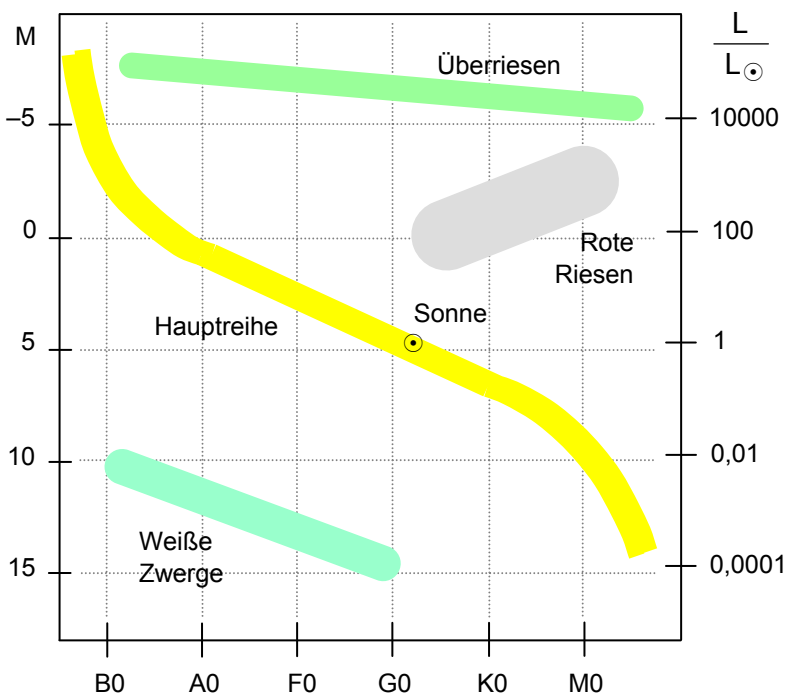
Ergänzung

Ergänzung zur Skala der Oberflächentemperatur: Sie verläuft entgegen der sonst üblichen Praxis von rechts nach links ansteigend und ist mit einer deutlichen Unsicherheit versehen, da die Temperaturangaben gerade zu O-, B- und M-Sterne in der Literatur erheblich schwanken.

Für die weiteren Überlegungen wird empfohlen, ein schematisches HRD zu verwenden, in das sich nach und nach die Bezeichnungen für die einzelnen Sterngruppen sowie typische Vertreter davon eintragen lassen. In Verbindung damit kann problemlos eine Achse für die relative Leuchtkraft ergänzt werden.

Die Einteilung dieser Achse folgt aus $\frac{L}{L_{\odot}} = 10^{0,4 \cdot (M_{\odot} - M)}$ und $M_{\odot} \approx 5$:

M	15	10	5	0	-5
$\frac{L}{L_{\odot}}$	0,0001	0,01	1	100	10000



Zur weiteren Charakterisierung der einzelnen Sterngruppen lassen sich das Stefan-Boltzmann-Gesetz $L = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4$ sowie die daraus abgeleitete Beziehung $L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4$ heranziehen.

Auf das jeweilige Entwicklungsstadium des Sterntyps geht man im Unterricht besser erst im Zusammenhang mit der Sternentwicklung ein.

Hauptreihensterne

Über 90 % aller Sterne liegen im HRD auf der Hauptreihe. Da der Verlauf der Hauptreihe bekannt ist, können für diese Sterne aus einer der Zustandsgrößen L , R bzw. T die beiden anderen einigmaßen genau ermittelt werden.

Hier kommt eine grundsätzliche Übereinstimmung der Hauptreihensterne bezüglich innerem Aufbau und Oberflächeneigenschaften zum Ausdruck. So nimmt zum Beispiel bei Hauptreihensternen mit steigender Oberflächentemperatur auch der Sternradius zu.

Ergänzung

Für Hauptreihensterne gelten empirisch die noch zu behandelnde Masse-Leuchtkraft-Beziehung

$\frac{L}{L_{\odot}} \approx \left(\frac{m}{m_{\odot}}\right)^3$ sowie $\frac{R}{R_{\odot}} \approx \left(\frac{m}{m_{\odot}}\right)^{0,6}$ Daraus folgt auch, dass der Radius von Hauptreihensternen mit der Temperatur steigt.

Der Großteil der Radien von Hauptreihensternen liegt im Bereich $0,5 R_{\odot} \leq R \leq 10 R_{\odot}$.

Typische Hauptreihensterne sind die Sonne, Sirius, Wega und Regulus.

Zur Charakterisierung der weiteren Gebiete des HRD ist folgende Überlegung hilfreich:

- Zwei Sterne, die im HRD senkrecht untereinander liegen, haben den gleichen Spektraltyp und damit die gleiche Oberflächentemperatur. Nach $L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4$ muss der hellere Stern auch der größere sein.
- Zwei Sterne, die im HRD auf einer Waagrechten liegen, haben die gleiche Helligkeit. Da die Temperatur nach rechts hin abnimmt, muss nach $L^* = (R^*)^2 \cdot (T^*)^4$ der rechts liegende kühlere Stern den größeren Radius haben.

Weißer Zwerge

Die Sterne der deutlich links unterhalb der Hauptreihe liegenden Gruppe liegen mit absoluten Helligkeiten zwischen 10 und 15 rund 10 Größenklassen unter den Hauptreihensternen der gleichen Oberflächentemperatur und besitzen nur etwa ein Zehntausendstel von deren Leuchtkraft.

Für ihre Radien gilt in etwa: $R \approx 0,01 R_{\odot}$

Die Radien liegen damit in der Größenordnung des Erdradius. Aufgrund dieser Eigenschaft werden sie als *Weißer Zwerge* bezeichnet.

Da die Masse dieser Sterne mit der Sonnenmasse vergleichbar ist, muss in ihnen die Materie sehr dicht gepackt sein. Ein Materiestück von der Größe einer Streichholzschachtel hat im Durchschnitt eine Masse von 10 t. Entsprechend hoch ist die Schwerkraft an der Oberfläche (relativistische Rotverschiebung der Spektrallinien) und die Dichte ihrer Atmosphäre (sehr breite Spektrallinien, charakteristisch für das Spektrum eines Weißen Zwerges).

Typische Beispiele für Weiße Zwerge sind die Doppelsternkomponenten Sirius B und Procyon B.

Riesensterne

Sterne der Gruppe rechts oberhalb der Hauptreihe haben im Vergleich zu Hauptreihensternen bei gleichem Spektraltyp eine relative Leuchtkraft in der Größenordnung 10^2 bis 10^3 . Sie haben damit Radien von grob zehn- bis 40 Sonnenradien und werden als (*Rote*) *Riesen* bezeichnet. Der entsprechende Bereich im HRD heißt *Riesenast*.

Da die Massen dieser Sterne in der Regel nur bei ein bis zehn Sonnenmassen liegen, ist die durchschnittliche Dichte dieser Sterne gering. Charakteristisch für das Spektrum von Roten Riesen sind die aufgrund der niedrigen Dichte ausgesprochen schmalen Absorptionslinien.

Typische Riesen sind zum Beispiel die Sterne Arctur, Aldebaran und Capella.

Überriesen

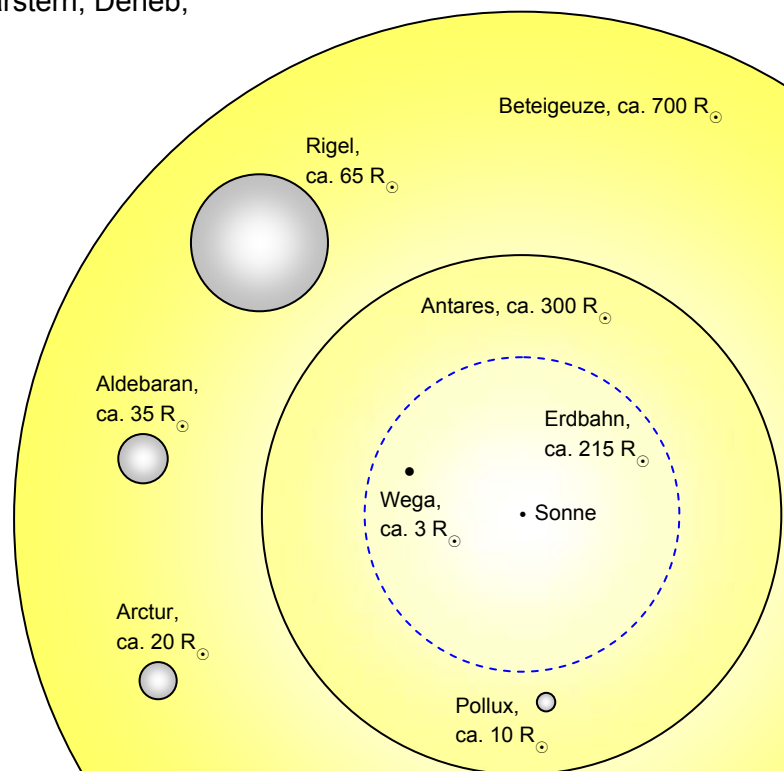
Am oberen Rand des HRD liegt eine Gruppe von Sternen, die noch erheblich größere relative Leuchtkräfte als die Roten Riesen haben. Ihre Radien erreichen Werte bis zu einigen Hundert Sonnenradien. Man bezeichnet diese Sterne als *Überriesen*.

Typische Beispiele sind der Polarstern, Deneb, Beteigeuze und Antares.

Die nebenstehende Graphik veranschaulicht die ungefähren Größenverhältnisse verschiedener Sterne.

(Die Literaturangaben zu den Sternradien differieren teilweise enorm.)

In Verbindung mit dieser Graphik sollte man die Schülerinnen und Schüler unbedingt darauf hinweisen, dass die Sterne auch in den größten Teleskopen nur als Punkte zu sehen sind.



Ergänzungen

- a) Der zwischen Hauptreihe und Riesenast gelegene Bereich der Unterriesen sowie die in der Verlängerung des Riesenasts zur Hauptreihe hin liegende Hertzsprung-Lücke werden im Unterricht nicht thematisiert.
- b) Wenn man die scheinbare Helligkeit eines Objekts in verschiedenen Spektralbereichen misst, ergeben sich aufgrund der spektralen Intensitätsverteilung des Objekts in der Regel unterschiedliche Werte. Meistens werden die Helligkeiten in den Standard-Bereichen Ultraviolett (um 365 nm, statt m_U kurz U), Blau (um 420 nm, statt m_B meist kurz B, nicht zu verwechseln mit der Spektralklasse B) und Visuell (um 550 nm), aber auch Rot (um 630 nm) sowie Infrarot (um 850 nm) bestimmt.

Beispiel:

Stern	Spektraltyp	Farbeindruck	B	V	R
α Peg	B9	weiß	2,44	2,47	2,46
β Peg	M2,5	rötlich	4,09	2,42	0,91

(nach Gondolatsch u. a., „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990)

Bei dem rötlich wirkenden Stern ist eine deutliche Zunahme der Helligkeit zum roten Spektralbereich hin festzustellen. Das legt nahe, dass der Unterschied der scheinbaren Helligkeiten verschiedener Spektralbereiche die Farbe des Objekts kennzeichnet.

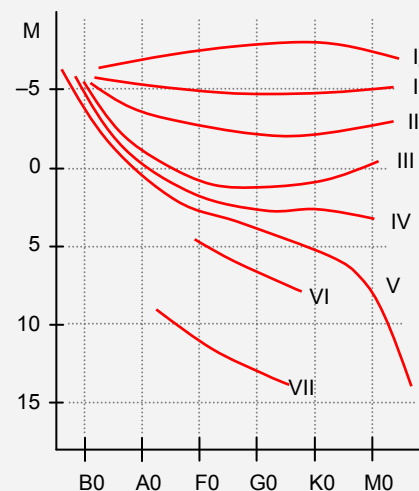
Die Differenz $m_{\text{kurzwellig}} - m_{\text{langwellig}}$ wird als *Farbindex* bezeichnet. Der Nullpunkt aller Farbindexe ist so festgelegt, dass der Stern Wega (α Lyr, Spektralklasse A0) den Farbindex 0,00 hat. Also ist der Farbindex für frühe Spektralklassen negativ (weil die Helligkeit im Blauen größer ist und damit m_B den kleineren Zahlenwert hat) und für späte Spektralklassen positiv. Damit ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Spektralklasse und Farbindex. In der Literatur wird deshalb an Stelle eines HRD auch häufig ein dazu gleichwertiges Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) verwendet.

c) Leuchtkraftklassen

Sterne des gleichen Spektraltyps können sehr unterschiedliche Leuchtkräfte haben. Mit zunehmender Leuchtkraft steigt auch der Sternradius, was sich bei etwa gleichen Sternmassen deutlich auf die Gravitationsbeschleunigung auf den Sternoberflächen und damit auf die Druck- und Dichteverhältnisse in den Sternatmosphären auswirkt. Dies führt bei den Sternen mit hoher Leuchtkraft zu einer geringeren Druckverbreiterung der Spektrallinien, diese sind also schmaler und schärfer ausgeprägt. Außerdem ändert sich die Stärke der Absorptionslinien von Ionen im Verhältnis zu denen neutraler Atome. Damit lassen sich Sterne gleichen Spektraltyps in unterschiedliche Leuchtkraftklassen einordnen.

Weit verbreitet ist das von Morgan und Keenan vorgeschlagene System:

Leuchtkraftklasse	Gruppe im HRD
I _a , I _b	Überriesen
II	helle Riesen
III	(normale) Riesen
IV	Unterriesen
V	Hauptreihensterne
VI	Unterkwerg
VII	Weißer Zwerg



Quelle und weiterführende Literatur:

Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005

Photometrische Entfernungsbestimmung

Wenn für einen Stern aus der genauen Analyse seines Spektrums sowohl die Spektralklasse als auch der Sterntyp bekannt sind, kann mit Hilfe des Hertzsprung-Russell-Diagramms auch seine absolute Helligkeit bestimmt werden. Damit lässt sich unter Verwendung von

$$r = 10^{0,2 \cdot (m-M)} \cdot 10 \text{ pc} \quad \left(\text{folgt aus } m - M = 5 \cdot \lg \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right) \right)$$

die Entfernung des Sterns berechnen.

Beispiel: Der Stern Deneb

Mit $m = 1,26$ und $M = -7,2$ erhält man $r = 10^{0,2 \cdot (1,26 + 7,2)} \cdot 10 \text{ pc} = 492 \text{ pc} = 1600 \text{ Lj}$.

Die obige Methode beruht darauf, dass die Entfernung mit Hilfe der scheinbaren und der absoluten Helligkeit eines Objekts ermittelt wird. Sie wird als *photometrische Entfernungsbestimmung* oder auch als *photometrische Parallaxe* bezeichnet (obwohl die Methode mit einer Parallaxe nichts zu tun hat). Da Leuchtkraftklassen nicht zu den Unterrichtsinhalten zählen, sollte man den Schülerinnen und Schülern mitteilen, dass die absoluten Helligkeiten von Sternen aus genauen Untersuchungen ihrer Spektren gewonnen werden.

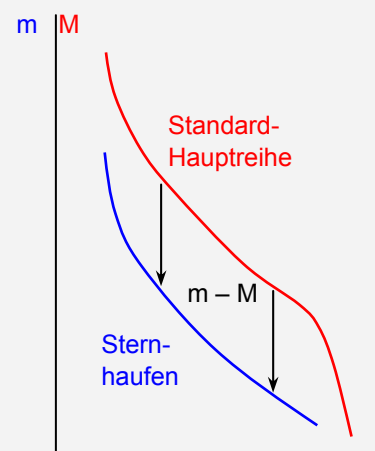
Die spektroskopische Entfernungsbestimmung ist weitreichender als die trigonometrische Parallaxe. Sie kann allerdings – vor allem bei Sternen, die nicht Hauptreihensterne sind – mit einer deutlichen Unsicherheit behaftet sein. Die Reichweite ist dadurch begrenzt, dass sich der Spektraltyp eines Sterns nur bis zu einer gewissen scheinbaren Helligkeit zuverlässig ermitteln lässt. Dies ist etwa bis $m = 14$ möglich. Für heiße Hauptreihensterne des Spektraltyps O reicht das Verfahren etwa bis 100 kpc, für die „kühleren“ Spektralklassen der Hauptreihe ist sie geringer.

Ergänzung

Eine spezielle Situation liegt bei Sternhaufen vor. Sie sind im Allgemeinen so weit von uns entfernt, dass von den Einzelsternen keine brauchbaren trigonometrischen Parallaxen ermittelt werden können. Der Entfernungsbestimmung eines Sternhaufens liegt die folgende Überlegung zugrunde:

Zunächst kann nur die scheinbare Helligkeit der Einzelsterne eines Haufens gemessen werden. Da die Ausdehnung des Sternhaufens aber klein ist gegenüber seiner Entfernung, kann man davon ausgehen, dass alle seine Sterne die gleiche Entfernung von uns haben und somit auch den gleichen Entfernungsmodul.

Trägt man nun in ein Standard-HRD statt der absoluten Helligkeiten die scheinbaren Helligkeiten der Haufensterne ein, erhält man ein HRD des Haufens, das gegen die Standard-Hauptreihe verschoben ist. Die Verschiebung erfolgt nach unten, da die Entfernung von Sternhaufen in jedem Fall größer 10 pc ist und damit für die Haufensterne $m > M$ gilt. Diese Verschiebung stellt nichts anderes als den Entfernungsmodul $m - M$ dar, aus dem sich schließlich die Entfernung des Haufens ergibt.



Doppelsterne

Doppelsterne sind Sternpaare, die gravitativ aneinander gebunden sind und sich um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Das legt nahe, dass sie demselben Entstehungsprozess entstammen. Etwa die Hälfte aller bekannten Sterne sind Mitglieder eines Doppel- oder Mehrfachsternsystems. Bislang weisen alle Untersuchungen darauf hin, dass unsere Sonne ein echter Einzelstern ist.

Zur Bezeichnungsweise: Üblicherweise spricht man beim helleren der beiden Sterne von Komponente A und beim anderen von Komponente B des Doppelsternsystems.

Ist die Entfernung eines solchen Systems bekannt, erlaubt eine Untersuchung der Bahnkurven, die Massen beider Sterne getrennt zu ermitteln. Dies ist das einzige direkte Verfahren zur Bestimmung von Sternmassen und hierin liegt auch die besondere Bedeutung der Doppelsterne.

Aufgrund der gravitativen Bindung der beiden Sterne gehorcht ihre Bewegung den Keplergesetzen. Das bedeutet, dass sich die beiden Komponenten auf Keplerellipsen um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Im Unterricht wird man sich auf den Spezialfall kreisförmiger Bewegungen beschränken.

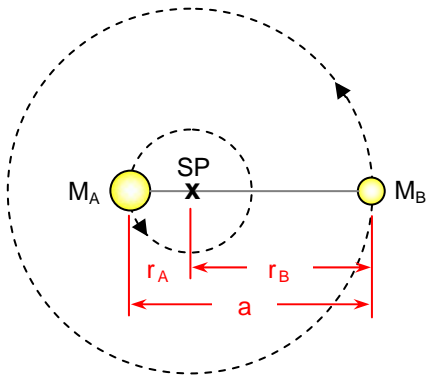
Ist a der mittlere Abstand und T die gemeinsame Umlaufdauer, so erhält man aus dem

3. Keplergesetz die Massensumme $M_A + M_B = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{T^2}$.

Daraus lassen sich die Einzelmassen berechnen, wenn zusätzlich das Massenverhältnis

$\frac{M_A}{M_B}$ bekannt ist. Dieses erhält man zum Beispiel aus dem Schwerpunktsatz

$$M_A r_A = M_B r_B.$$



Die Skizze zeigt den Spezialfall kreisförmiger Bewegungen der beiden Komponenten um den gemeinsamen Schwerpunkt (bei senkrechtem Blick auf die Bahnebene). Mit zwei Styroporkugeln, die auf einem dünnen Holzstab befestigt werden, lassen sich sowohl diese Konstellation als auch die verschiedenen Doppelsternstypen sehr gut veranschaulichen. Die Anordnung ist auch im Zusammenhang mit extrasolaren Planeten hilfreich.

Abhängig von der Nachweismethode unterscheidet man vier Doppelsternstypen. Die grundsätzlichen Unterschiede sollen kurz erläutert werden. Es bietet sich auch die Erarbeitung in Form eines Expertenpuzzles an, wobei die visuellen und die astrometrischen Doppelsterne von der gleichen Gruppe zu bearbeiten sind.

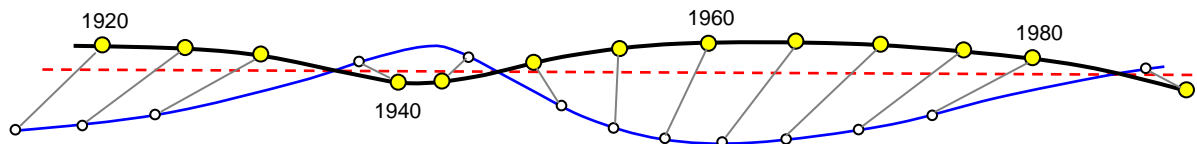
Visuelle Doppelsterne

Beide Sterne können getrennt beobachtet werden. Wenn sich ihre Relativbewegung durch Messungen erfassen lässt, erhält man T und den scheinbaren Winkelabstand. Bei bekannter Entfernung lässt sich daraus der Abstand a der beiden Sterne berechnen.

Beispiel: α Centauri, $T = 80,1$ a

Astrometrische Doppelsterne

In diesem Fall ist nur der Hauptstern direkt beobachtbar. Der Begleitstern beeinflusst jedoch die Bewegung des Hauptsterns.



Die Skizze bezieht sich auf das historische Beispiel Sirius (α CMa, $T = 50$ a). Aus dem Verlauf der Bahn von Sirius A (schwarz dargestellt mit Angabe von Jahreszahlen) konnte auf seinen Begleiter geschlossen werden, dessen Bahn blau gezeichnet ist. Die rot gestrichelte Linie markiert die Bahn des gemeinsamen Schwerpunkts.

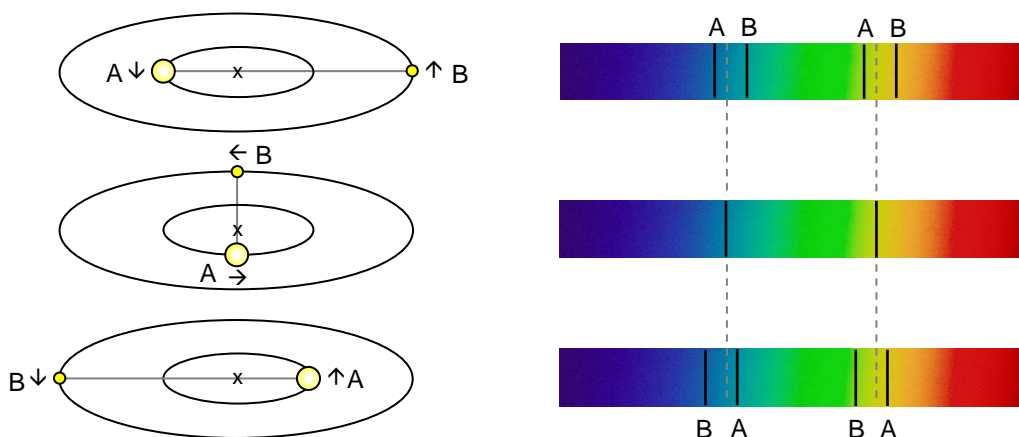
Durch die enorm verbesserten Beobachtungsmöglichkeiten sind viele der in früheren Jahren als astrometrisch eingestuften Doppelsterne heute als visuelle Doppelsterne bekannt.

Spektroskopische Doppelsterne

Solche Systeme sind im Allgemeinen weiter entfernt. Ihre Komponenten haben einen geringen Abstand und sind deshalb nicht getrennt beobachtbar. Die Doppelsternnatur ist aus einer periodischer Verschiebung der Spektrallinien erkennbar, die sich mit Hilfe des Dopplereffekts erklären lässt.

Beispiel: α Aurigae (Capella), $T = 104$ d

In der folgenden Veranschaulichung haben die beiden Komponenten unterschiedliche Massen und bewegen sich auf verschieden großen Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt. Der Betrachter auf der Erde blickt schräg auf die Bahnebene, deshalb erscheinen die Kreisbahnen elliptisch verzerrt. Die Komponente links vom Schwerpunkt bewegt sich jeweils auf den Betrachter zu, ihre Spektrallinien sind also zu kleineren Wellenlängen hin verschoben (Blauverschiebung), die Komponente rechts vom Schwerpunkt bewegt sich jeweils vom Betrachter weg, ihre Spektrallinien sind zu größeren Wellenlängen hin verschoben (Rotverschiebung).



Meist kann nur das Spektrum des Hauptsterns erfasst werden. In diesem Fall ist eine Massenbestimmung nur dann möglich, wenn der Hauptstern zugleich ein Bedeckungsveränderlicher ist (siehe unten).

Im günstigeren Fall ist die periodische Linienverschiebung für beide Komponenten getrennt registrierbar. Daraus lassen sich Informationen über die Bahngeschwindigkeiten und somit über das Massenverhältnis der zwei Sterne gewinnen.

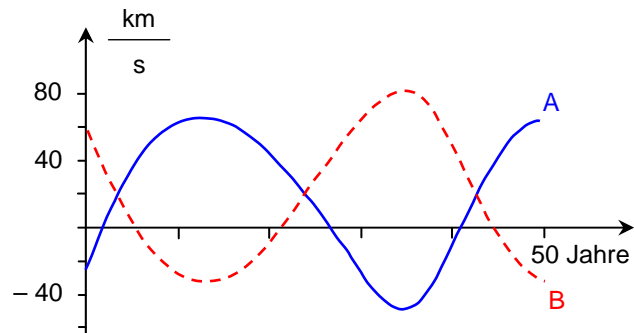
Das nebenstehende Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der Radialgeschwindigkeiten eines hypothetischen Doppelsternsystems.

Daraus lässt sich ablesen bzw. folgern:

Die Umlaufdauer beträgt 40 a; der

Schwerpunkt des Systems bewegt sich

mit $20 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ vom Beobachter weg.



Für die Bahngeschwindigkeiten erhält man $v_A = 30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $v_B = 60 \frac{\text{km}}{\text{s}}$,

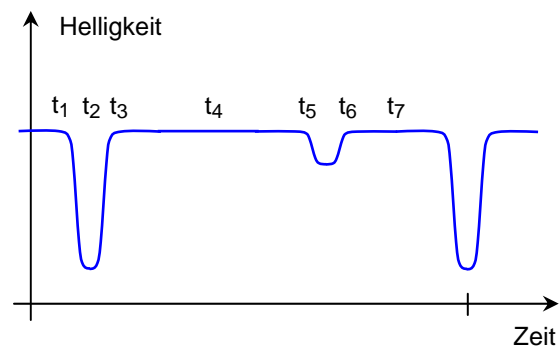
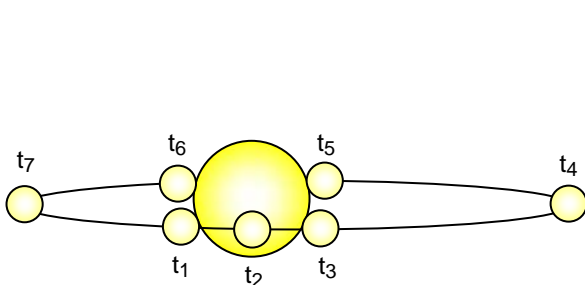
woraus $m_A : m_B = v_B : v_A = r_B : r_A = 2:1$ folgt.

Bei kreisförmigen Bahnen der beiden Komponenten ergibt sich im Diagramm ein symmetrischer Kurvenverlauf. Bei elliptischen Bahnen weicht der Kurvenverlauf deutlich von dieser Symmetrie ab.

Photometrische Doppelsterne

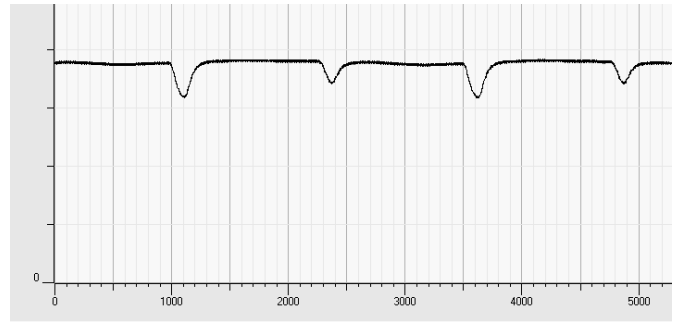
Die Komponenten sind nicht getrennt beobachtbar. Wenn die Beobachtungsrichtung nahezu in der Bahnebene der beiden Sterne liegt, führt die periodische gegenseitige Bedeckung zu einer Änderung der Gesamthelligkeit. Der Bahnlauf und die daraus resultierende Helligkeitskurve solcher *Bedeckungsveränderlicher* sind in der folgenden Graphik schematisch veranschaulicht.

Beispiel: β Persei (Algol), $T = 2,9 \text{ d}$



Auf Feinheiten und Einzelbetrachtungen von Lichtkurven sollte verzichtet werden.

Ein photometrisches Doppelsternsystem lässt sich zum Beispiel mit der nachfolgenden Anordnung simulieren. Sie besteht aus zwei unterschiedlich großen Glühlampen, die sich, angetrieben durch einen Motor, gegenseitig umkreisen. In Verbindung mit einem lichtempfindlichen Sensor ist es möglich, den Helligkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit aufzuzeichnen. Unschön ist bei dieser Apparatur der unweigerliche „Helligkeits-Netzbrumm“. Dieser lässt sich umgehen, wenn man batteriebetriebene Glühlämpchen verwendet, die auf einer vom Experimentiermotor langsam angetriebenen Drehscheibe liegen. Mit Hilfe einer Messwerterfassung lässt sich auf einfache Weise das zugehörige Helligkeitsdiagramm aufzeichnen.



(Erstellt mit CASSY, Leybold)

Im Zusammenhang mit Doppelsternen sollte den Schülerinnen und Schülern in aller Kürze auch ein komplexeres System vorgestellt werden. Die folgende (nicht maßstabsgetreue) Darstellung zeigt das Sechsfachsystem Castor.



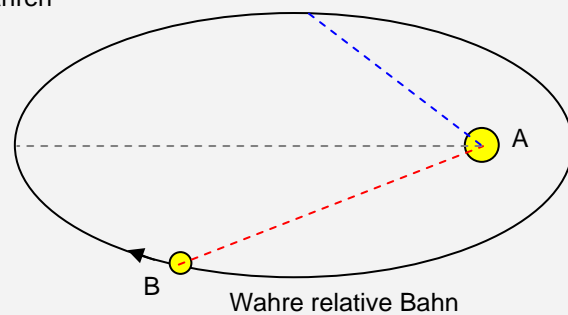
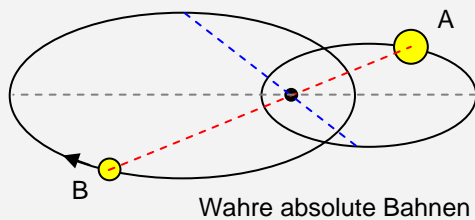
Das System Castor (α Gem) ist visuell dreifach. Es liegt in einer Entfernung von 13,7 pc, die scheinbare Gesamthelligkeit beträgt 1,59.

	Castor A	Castor B	Castor C
Art	spektroskopisch doppelt	spektroskopisch doppelt	Bedeckungsveränderlicher
scheinbare Helligkeit	1,9	2,9	zwischen 9,1 und 9,7
Umlaufdauer um den Systemschwerpunkt	grob 460 a	grob 460 a	geschätzt > 10 000 a
Umlaufdauer der beiden Komponenten	9,21 d	2,93 d	19,5 h
Winkeldistanz	zwischen A und B im Jahr 2000: 3,9" zwischen A und B im Jahr 2005: 4,3"		73" (zum Schwerpunkt von A und B)

Quelle: Keller, „Kosmos Himmelsjahr 1995“, Kosmos Verlag, Stuttgart

Ergänzungen

- In der Literatur wird für zwei zufällig eng beieinander stehende Sterne manchmal die Bezeichnung „optischer Doppelstern“ verwendet, obwohl die beiden Sterne gravitativ nicht aneinander gebunden sind und sich daher nicht gegenseitig umrunden. Um Missverständnissen vorzubeugen, sollte diese Bezeichnung im Unterricht nicht verwendet werden, zumal solche Sterne astrophysikalisch meist auch nicht interessant sind.
- Nur in Ausnahmefällen blickt der Beobachter senkrecht auf die Bahnebene eines Doppelsterns. Deshalb liefert die Beobachtung im Normalfall nicht die wahre Bahn, sondern deren senkrechte Projektion auf die Himmelskugel. Da sich bei rein spektroskopischen Doppelsternen der Winkel zwischen Bahnebene und Projektionsebene nicht ermitteln lässt, kann die Dopplermethode nur Untergrenzen für die Sternmassen liefern.
- Bei der Beobachtung visueller Doppelsterne ist deren gemeinsamer Schwerpunkt nicht ersichtlich, so dass ihre Ellipsenbahnen auch nicht unmittelbar beobachtet werden können. Deshalb wählt man in der Regel den Hauptstern als Bezugspunkt und trägt die Lage des Begleiters diesbezüglich an. So ergibt sich eine relative Bahnellipse, die zu den wahren Bahnellipsen ähnlich ist.



- Die senkrechte Projektion der wahren Bahn auf die Himmelskugel wird als scheinbare Bahn bezeichnet. Wenn ausreichend viele Punkte der scheinbaren Bahn ausgemessen wurden, lassen sich daraus durch Rechnung die wahren Bahnen um den Schwerpunkt bestimmen. Man darf sich übrigens nicht irritieren lassen: Die Projektion des Hauptsterns liegt nicht im Brennpunkt der scheinbaren relativen Bahnellipse.
- Bedeckungsveränderliche spielen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung von Sterndurchmessern. Der zeitliche Verlauf des Bedeckungsvorgangs lässt sich recht genau ausmessen. Unter der Voraussetzung, dass auch die Bahngeschwindigkeiten der beiden Komponenten ermitteln werden können, lassen sich daraus letztlich die Sterndurchmesser berechnen. Dies ist derzeit eine der wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Sterndurchmessern.

Weiterführende Literatur:

Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005

Nachweis von extrasolaren Planeten

Wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, steht die Entstehung von Planeten in unmittelbarem Zusammenhang mit Sternbildungsprozessen. Das legt die Vermutung nahe, dass sich auch um andere Sterne als unsere Sonne Planeten gebildet haben. Solche Planeten werden als *extrasolare Planeten* (kurz Exoplaneten) bezeichnet. Nachdem 1995 um den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi ein Planet etwa von der Größe Jupiters entdeckt wurde, setzte eine systematische Suche nach diesen Objekten ein. Derzeit (Stand Anfang April 2008) sind über 280 Planeten außerhalb unseres Sonnensystems bekannt.

Auf der Suche nach ihnen werden teilweise Verfahren benutzt, wie sie auch bei der Untersuchung von Doppelsternen Anwendung finden. Deshalb ist es sinnvoll, im Unterricht erst an dieser Stelle ganz prägnant auf die wichtigsten Nachweistechiken einzugehen.

Spektroskopischer Nachweis

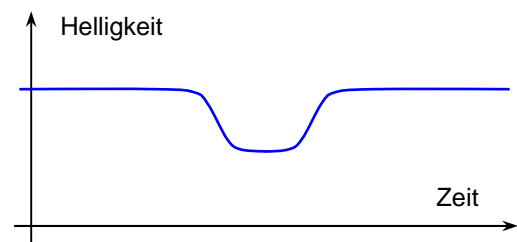
Mit dieser Beobachtungsmethode wurden bisher die meisten Exoplaneten nachgewiesen. Die Bewegung von Stern und Planet erfolgt um den gemeinsamen Schwerpunkt. Bei masse-reichen Planeten macht sich dies in einer periodischen Änderung der Radialgeschwindigkeit des Sterns bemerkbar, die sich mit Hilfe des Dopplereffekts registrieren lässt. Während die zu erfassenden Radialgeschwindigkeiten bei Doppelsternen im Bereich einiger $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ liegen, sind hier Geschwindigkeiten im Bereich von einigen $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu erfassen. Man sollte den Schülerinnen und Schülern unbedingt verdeutlichen, welche enormen Anforderungen dabei an die Messtechnik gestellt werden.

Die folgende Überlegung geht auf den unten aufgeführten Artikel von O. Fischer zurück:

Die Nachweisgrenze liegt zur Zeit etwa bei $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Für diese Geschwindigkeit beträgt die Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda$, was mit $\lambda = 500 \text{ nm}$ auf $\Delta\lambda \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$ führt. Könnte man den Spektralbereich von 380 nm bis 750 nm auf einer Länge von 100 km darstellen, so würden die errechneten $1 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$ in dieser Darstellung einer Verschiebung von weniger als 3 mm entsprechen.

Photometrischer Nachweis

Hierfür muss die Beobachtungsrichtung nahezu in der Umlaufebene des Planeten liegen. Aufgrund dieser Forderung reduziert sich die Anzahl der möglichen Kandidaten deutlich. Ist die Bedingung erfüllt, so lässt sich beim Transit eines ausreichend großen Planeten ein Rückgang der Sternhelligkeit beobachten (siehe schematische Darstellung).



Dies lässt sich (in Abwandlung eines Vorschlags von Fischer, siehe Quellenangabe) wie folgt veranschaulichen: Im abgedunkelten Raum wird mit der teilweise abgedeckten Projektionsfläche des Tageslichtprojektors die Sternscheibe dargestellt. Nun bewegt man einfach die Handfläche über diese Fläche und simuliert so den vorbeiziehenden Planeten. Wesentlich ist, dass sich dabei ein geringfügiger Rückgang der Raumhelligkeit feststellen lässt. Der Versuch darf nicht zu der Vorstellung führen, man könne die Verfinsterung direkt beobachten.

Astrometrischer Nachweis

Durch die Bewegung von Stern und Planet um den gemeinsamen Schwerpunkt kommt es zu einer minimalen, periodischen Lageveränderung des Sterns (quer zur Beobachtungsrichtung). Diese gilt es zu erfassen. Wie hoch der dabei an die Messtechnik zu stellende Anspruch ist, zeigt sich an folgendem Beispiel: Aus einer Entfernung von 10 pc betrachtet würde sich die Lage unserer Sonne infolge der Planetenbewegungen um höchstens 0,001 Bogensekunden verändern. Das entspricht dem Winkeldurchmesser eines Haares in 20 km Entfernung (nach Fischer bzw. Wambsganß, siehe Quellenangabe).

Die in den bisher dargestellten Nachweisverfahren geforderten Anforderungen an die Messgenauigkeit legen nahe, dass sich diese Methoden nur zum Nachweis großer, in geringer Distanz umlaufender Planeten eignen. Insbesondere kann die astrometrische Methode nur bei sonnennahen Sternen angewendet werden.

Ergänzungen

Der Nachweis von extrasolaren Planeten ist nicht auf die drei bisher aufgeführten Beobachtungstechniken beschränkt. Den im Folgenden aufgeführten Verfahren kommt aber derzeit nur geringe Bedeutung zu.

- Pulsar-Timing:** Diese Methode setzt Objekte voraus, die wie Pulsare regelmäßig Radiosignale aussenden. Die von Pulsaren kommenden Signale treffen mit einer unglaublichen zeitlichen Präzision auf der Erde ein. Wird ein Pulsar von einem Planeten umrundet, führt die Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt zu geringfügigen, periodischen Entfernungänderungen zwischen Neutronenstern und Beobachter. Dies hat minimale, wieder periodische Abweichungen der Signalankunftszeiten zur Folge. Aus diesen Abweichungen konnte tatsächlich auf Planeten um Pulsare geschlossen werden.
- Microlensing:** Regelmäßige Helligkeitsmessungen eines Hintergrundsterns werden durch einen nahe der Sichtlinie stehenden Vordergrundstern durch den Mikrogravitationslinseneffekt in charakteristischer Weise beeinflusst. Wird der Vordergrundstern von einem Planeten umrundet, führt das zu Abweichungen in der Helligkeitsmessung des Hintergrundsterns und lässt so den Rückschluss auf den Planeten zu. Die Methode hat den Vorteil, dass man mit ihr auch Planeten nachweisen kann, deren Masse in der Größenordnung der Erdmasse liegt. Die Effizienz der Methode wird allerdings als gering eingeschätzt.
- Direkter Nachweis:** Die direkte Beobachtung im sichtbaren Licht ist wegen der gewaltigen Unterschiede im Strahlungsfluss von Stern und Planet äußerst schwierig. Diese Unterschiede sind im mittleren und fernen Infrarotbereich geringer, so dass in Verbindung mit einer adaptiven Optik und Speckle-Interferometrie ein direkter Nachweis grundsätzlich möglich ist. Die ESO meldete im September 2004 erstmals den direkten Nachweis eines Exoplaneten um den braunen Zwerg 2M1207. Von der Universität Jena kam im März 2005 die Meldung über den direkten Nachweis eines extrasolaren Planeten um den Stern GQ Lupi.

Quellen und weiterführende Literatur:

Wambsganz, „Planeten um andere Sterne“, *Astronomie + Raumfahrt* 38 (2001) 1, Friedrich-Verlag, Seelze
 Fischer, „Extrasolare Planeten – Entdeckung im Klassenraum“, *Astronomie + Raumfahrt* 42 (2005) 6, Friedrich-Verlag, Seelze
 Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005, S. 103 ff.

Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung

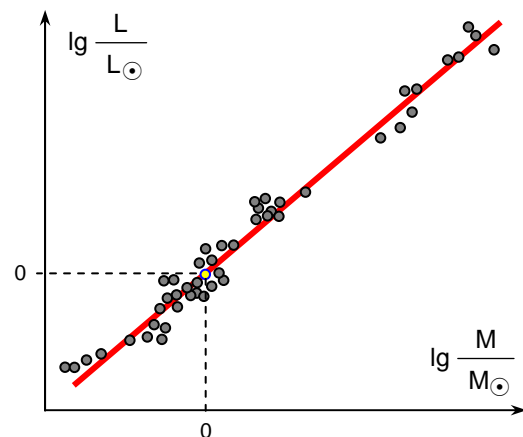
Von Hauptreihensternen, die Mitglieder von Doppelsternsystemen sind, lässt sich die Masse einigermaßen präzise ermitteln.

Trägt man doppelt-logarithmisch die relative Leuchtkraft in Abhängigkeit von der relativen Masse auf (siehe nebenstehendes schematisches Diagramm), so zeigt sich grob

$$\lg \frac{L}{L_{\odot}} \sim \lg \frac{M}{M_{\odot}}, \text{ bzw. } \lg \frac{L}{L_{\odot}} = k \cdot \lg \frac{M}{M_{\odot}}.$$

Für den Steigungsfaktor ergibt sich im Mittel der Wert $k = 3$.

Damit erhält man die wichtige Masse-Leuchtkraft-Beziehung: $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3$.

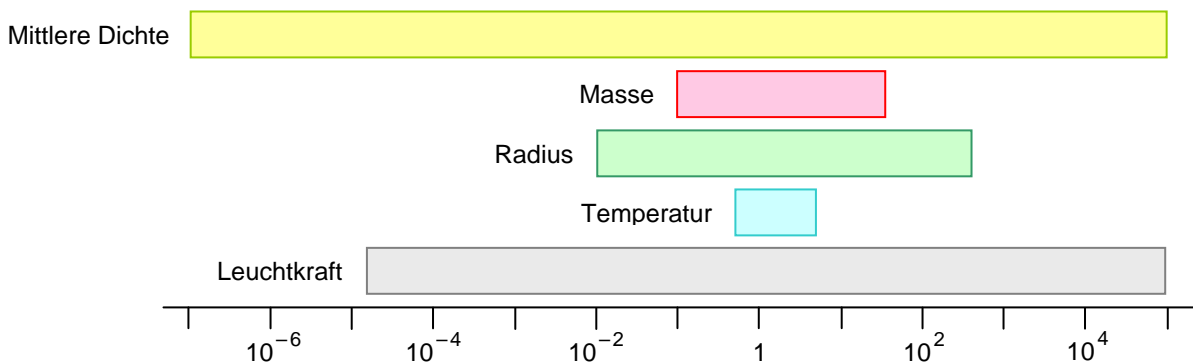


Diese empirische Beziehung gilt nur für Hauptreihensterne und auch hier nur näherungsweise. In ihr kommt zum Ausdruck, dass die Hauptreihensterne nach dem gleichen Schema aufgebaut sind. Eine bestimmte Sternmasse führt also zu einer bestimmten Energieproduktion und damit zu einer bestimmten Leuchtkraft. Insbesondere wird deutlich, dass massereiche Sterne mit ihrer Energie sehr „großzügig“ umgehen.

Für Sterne außerhalb der Hauptreihe kann diese Beziehung wegen des ganz anderen inneren Aufbaus nicht gültig sein.

Zustandsgrößen im Überblick

In der folgenden Graphik sind einige Zustandsgrößen jeweils in Vielfachen des Sonnenwertes dargestellt. Bemerkenswert ist, dass Masse und Temperatur der Sterne nur in relativ kleinen Bereichen schwanken, während Leuchtkraft und mittlere Dichte in weitaus größeren Bereichen variieren.



Sternentwicklung

Da jeder Stern nur einen begrenzten Vorrat an fusionierbarem Material hat, kann kein Stern beliebig lange existieren. Es muss also für jeden Stern eine zeitliche Entwicklung geben, beginnend mit seiner Entstehung bis hin zu seinem Ende.

Selbstverständlich ist es nicht möglich, eine derartige Entwicklung direkt zu beobachten. Da man aber davon ausgehen muss, dass es sich bei den einzelnen Sterntypen um Sterne in unterschiedlichen Entwicklungsphasen handelt, gibt es genügend Objekte, die sich beobachten lassen und anhand derer sich der Entwicklungsprozess typischer Sterne studieren lässt. Ebenso wichtig ist, dass der Lebensweg von Sternen mit aufwändigen Computerberechnungen (1965 Kippenhahn und Weigert, 1969 Larson) in Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten im Wesentlichen zutreffend beschrieben werden konnte.

Erfreulicherweise bieten sich gerade bei diesem Thema eine Vielzahl verschiedener Arbeits- und Sozialformen an, die eine abwechslungsreiche Unterrichtsgestaltung ermöglichen:

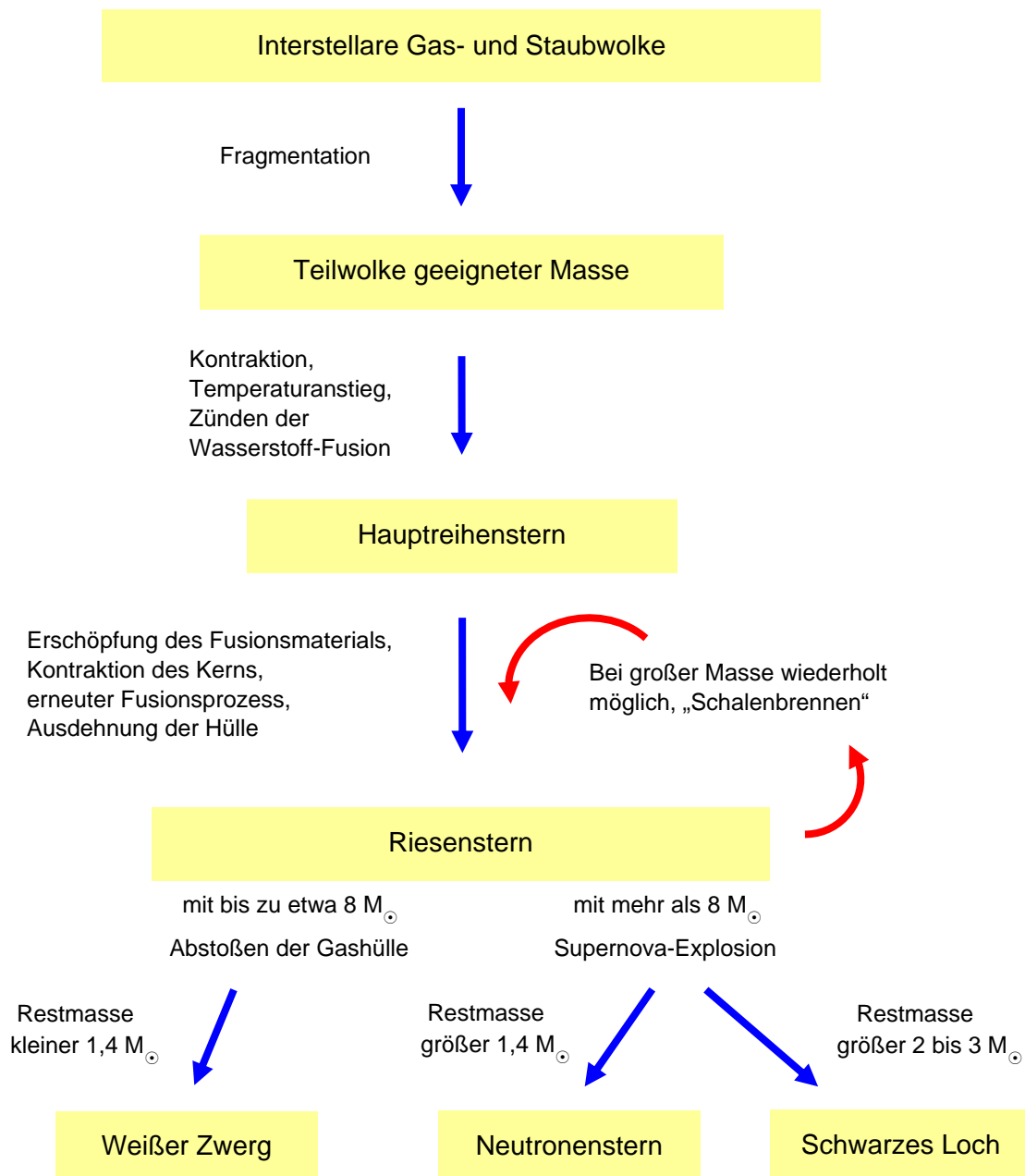
arbeitsteilige Gruppenarbeit, Expertenpuzzle, Kurzreferate, projektorientiertes Arbeiten, Lernzirkel.

Unabhängig von der gewählten Unterrichtsform sollen die Schülerinnen und Schüler lernen,

- woraus Sterne entstehen und welche wesentlichen Prozesse bis zum Erreichen des Hauptreihenstadiums ablaufen,
- was das Hauptreihenstadium eines Sterns charakterisiert und wie lange dieses anhält,
- welche Prozesse nach Beendigung des Hauptreihenstadiums einsetzen und
- welche Endstadien Sterne erreichen können.

Wegen der Komplexität der Thematik ist unbedingt eine Beschränkung auf die fundamentalen Überlegungen notwendig. Als wesentlicher Aspekt muss jedoch deutlich herausgearbeitet werden, dass in allen Entwicklungsstadien eines Sterns seine Masse der entscheidende Parameter ist. Nebenbei sollte den Schülerinnen und Schülern bewusst werden, dass es eine ganze Reihe noch nicht ausreichend verstandener Sachverhalte gibt, die einer Klärung durch weiter verbesserte Modelle und Beobachtungstechniken bedürfen.

Einen Überblick über die Sternentwicklung liefert die folgende Graphik.



Sterne entstehen aus Gas und Staub

Bis in das 18. Jahrhundert hinein hatte sich die auf Aristoteles zurückgehende Vorstellung von der Unveränderlichkeit des Himmels gehalten, nach der Sterne als etwas einmalig Erschaffenes keinen weiteren Veränderungen unterliegen. 1755 formulierte Immanuel Kant die philosophisch begründete Idee eines „Urnebels“, aus dem die Sonne und die Planeten entstanden sind.

Bilder von jungen Sternen zeigen diese oft eingebettet in interstellare Wolken und untermauern die Vorstellung, dass Sterne tatsächlich aus riesigen Gas- und Staubwolken entstehen. Damit es zum erforderlichen Kollaps einer solchen Wolke kommt, muss in ihr der Gravitationsdruck größer als der Gasdruck sein. Hierfür ist eine gewisse Mindestmasse der Wolke notwendig, die bei einer Anfangsdichte von ca. 100 Molekülen je cm^3 und einer Temperatur von 50 K bis 100 K einige tausend Sonnenmassen beträgt.

Nachdem Einzelsterne mit derart großen Massen nie beobachtet wurden, muss man davon ausgehen, dass während des Kollapses der Riesenwolke ein Zerfall in Teilwolken (*Fragmentation*) stattfindet, die ihrerseits kontrahieren und sich dabei zum Teil in noch kleinere Wolken aufspalten.

Manche von ihnen kollabieren dann in verhältnismäßig kurzer Zeit (einige 10^5 a) im freien Fall und beginnen erst jetzt, sich dabei aufzuheizen. Die Wolke nimmt zunächst Kugelform an mit einem immer dichter werdenden Zentrum, außerdem formt sich um dieses Zentrum eine Akkretionsscheibe aus Gas und Staub, die auch Grundlage für eine Planetenbildung ist (→ Kapitel 1.2, Entstehung des Sonnensystems).

Auf das Zentrum „regnen“ nun gewaltige Gasmassen ab, so dass Druck und Temperatur im Kernbereich enorm ansteigen, bis die Bedingungen zum Zünden der Wasserstoff-Fusion gegeben sind. Der *Protostern* hat das Vor-Hauptreihenstadium erreicht und stabilisiert sich.

Interessant ist, dass der Protostern schon vor dem Zünden der Fusion sehr viel Strahlung abgibt. Die Energie stammt aus der frei werdenden Gravitationsenergie der Materie, die auf das Zentrum abregnet, und wird hauptsächlich als UV-Strahlung abgegeben. Diese wird in den umgebenden Staubzonen in ferne IR-Strahlung und Radiostrahlung umgewandelt. Man kann den Stern also nur als Infrarot- und Radioquelle wahrnehmen.

Schließlich ist bemerkenswert, dass Sterne infolge der Fragmentation niemals einzeln entstehen, sondern immer in Gruppen (*Assoziationen* oder Sternhaufen). Eine Folge der Fragmentation ist auch, dass nur aus etwa 10 % der Masse der ursprünglichen Wolke neue Sterne gebildet werden.

In der Milchstraße gibt es zahlreiche Sternentstehungsgebiete. Die folgenden Beispiele werden auch deshalb genannt, weil von ihnen eindrucksvolles Bildmaterial zu finden ist: der Orion-Nebel (M42), der Adler-Nebel (M16) im Sternbild Schlange, der Rosetten-Nebel (NGC 2237) und der Konus-Nebel (NGC 2264) im Sternbild Einhorn sowie der Lagunen-Nebel (M8) im Sternbild Schütze. Auch von der Umgebung des Sterns ζ Ori (linker Gürtelstern) mit dem Emissionsnebel NGC 2024 gibt es interessante Aufnahmen.

Ergänzungen

- a) Zu den Bezeichnungen für Sternhaufen, Nebel und Galaxien:

Beispiel	verwendeter Katalog
M 31 (Andromeda-Galaxie)	Messier-Katalog von C. Messier (1784), ursprünglich 103 Einträge, später 110 Einträge
NGC 2237 (Rosetten-Nebel)	New General Catalogue von J. Dreyer (1888), knapp 8 000 Einträge
IC 2602 (offener Sternhaufen im Sternbild Carina)	Index Catalogue von J. Dreyer (1895), zweistufige Erweiterung des NGC, über 5 000 Einträge

- b) Der Gravitationskollaps einer Molekülwolke setzt ein, wenn die potenzielle Energie der Moleküle des Wolken-Randbereichs größer als ihre thermische Energie ist. Aus diesem Ansatz folgt das *Jeans-Kriterium*, eine Abschätzung der für den Kollaps erforderlichen Mindestmasse M , die hier in der Form

$$M > \sqrt{\left(\frac{T}{50\text{K}}\right)^3 \cdot \frac{10^{-20}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{\rho}} \cdot 10^3 M_{\odot}$$

wiedergegeben ist (siehe Weigert, Wendker,

Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – Ein Grundkurs“, Wiley VCH, Weinheim 2005, S. 185).

Der Ausdruck ist bereits auf die für interstellare Wolken typischen Ausgangswerte für T und ρ abgestimmt. Es lässt sich auch gut ablesen, dass die Massengrenze für den Kollaps von Teilwolken infolge ihrer bereits größeren Dichte kleiner wird (solange die Temperatur durch Energieabstrahlung nicht wesentlich steigt).

- c) Ausschlaggebend für die Fragmentation einer interstellaren Molekülwolke sind Dichtefluktuationen innerhalb der Wolke, die durch verschiedene Einflüsse herbeigeführt werden können. Unter anderem werden diskutiert: der Ausdehnungsdruck heißer Gasregionen, durch Supernovae ausgelöste Schockwellen, kosmische Magnetfelder, die Strahlung von Sternen, die sich durch die Wolke hindurch bewegen.
- d) Die bisherigen Beobachtungen zeigen, dass nur Sterne mit Massen von ungefähr $0,1 M_{\odot}$ bis $100 M_{\odot}$ existieren. Dabei sind massearme Sterne um ein Vielfaches häufiger als massereiche. Das liegt auch daran, dass nach dem Entstehen mehrerer massereicher Sterne das Entstehungsgebiet durch ihre intensive Strahlung derart aufgeheizt wird, dass eine weitere Sternbildung kaum mehr stattfindet.
- e) Bei Objekten mit Startmassen von $0,075 M_{\odot}$ und kleiner kann sich eine dauerhafte Fusion im Zentralbereich nicht einstellen (eine Elementzusammensetzung ähnlich wie bei der Sonne vorausgesetzt). Die einzige Energiequelle ist in diesem Fall die frei werdende Gravitationsenergie. Durch Abgabe von Strahlung kühlen diese Objekte langsam aus. Man nennt sie *braune Zwerge*.
- f) Eine Sternassoziation ist eine einem offenen Sternhaufen ähnliche, besonders lockere Ansammlung aus wenigen bis zu höchstens 100 sehr jungen und extrem hellen Sternen gemeinsamen Ursprungs. Die Sterne vom Typ O oder B sind sich physikalisch sehr ähnlich, jedoch gravitativ nicht aneinander gebunden. Eine Konzentration um ein gemeinsames Zentrum ist oft nicht oder nur äußerst mühsam erkennbar.

Das Hauptreihenstadium

Dieses Entwicklungsstadium zeichnet sich dadurch aus, dass die Kontraktion zum Stillstand gekommen ist und im Zentralbereich des Sterns Wasserstoff zu Helium fusioniert wird. Der Stern ist jetzt Hauptreihenstern und befindet sich in einem stabilen Gleichgewichtszustand zwischen dem Gravitationsdruck einerseits und dem Gas- und Strahlungsdruck andererseits.

Das Hauptreihenstadium ist die bei weitem längste Phase im Verlauf eines „Sternlebens“. Das erklärt, warum im HRD die Hauptreihe besonders dicht mit Bildpunkten von Sternen belegt ist. Ein Stern verbleibt so lange im Hauptreihenstadium, bis der Wasserstoffvorrat im Zentralbereich (er macht etwa 10 % des gesamten ursprünglichen Wasserstoffs im Stern aus) praktisch vollständig zu Helium fusioniert ist. Die entsprechende Zeitspanne wird als *Verweildauer* t_{HR} bezeichnet. Sie lässt sich wie folgt abschätzen:

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{HR}} \text{ ist direkt proportional zum „Vorrat“: } t_{\text{HR}} \sim M \\ t_{\text{HR}} \text{ ist indirekt proportional zum „Verbrauch“: } t_{\text{HR}} \sim \frac{1}{L} \\ \text{Einbezug der Masse-Leuchtkraft-Beziehung: } L \sim M^3 \end{array} \right\} \Rightarrow t_{\text{HR}} \sim \frac{1}{M^2}$$

Speziell für die Sonne gilt $t_{\text{HR}\odot} \sim \frac{1}{M_{\odot}^2}$. Durch Quotientenbildung folgt schließlich

$$\frac{t_{\text{HR}}}{t_{\text{HR}\odot}} = \frac{1}{\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^2} \quad \text{beziehungsweise} \quad t_{\text{HR}} = \frac{1}{\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^2} \cdot t_{\text{HR}\odot}, \quad \text{wobei } t_{\text{HR}\odot} \approx 10^{10} \text{ a.}$$

Wieder ist die Masse die entscheidende Größe. Die Verweildauer ist umso größer, je kleiner die Masse eines Sterns ist. Massearme Sterne gehen mit ihren Energievorräten also wesentlich sparsamer um als massereiche Sterne. Das erklärt, warum die Hauptreihe im Bereich der späten Spektralklassen deutlich stärker besetzt ist.

Umgekehrt entwickeln sich massereiche Sterne besonders schnell. Deshalb müssen die Hauptreihensterne des Spektraltyps O und B (die mit ihrer hohen Leuchtkraft gemäß Masse-Leuchtkraft-Beziehung auch eine große Masse haben) junge Sterne sein, und ihre Lage am Himmel ist signifikant für ein Sternentstehungsgebiet.

Mit $t_{\text{HR}\odot} = 10 \cdot 10^9$ a erhält man folgende Vergleichstabelle:

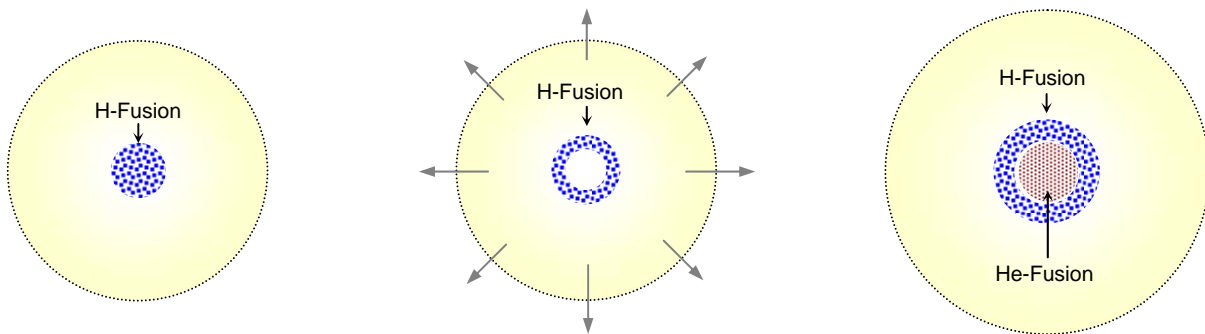
Spektraltyp	O5	B0	A0	F0	G0	K0	M0
$\frac{M}{M_{\odot}}$	50	18	3,2	1,8	1,1	0,8	0,5
t_{HR} in Jahren	$0,004 \cdot 10^9$	$0,03 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^9$	$40 \cdot 10^9$

Vom Hauptreihenstern zum Riesenstern

Unabhängig von der Masse erschöpfen sich bei jedem Stern zum Ende des Hauptreihenstadiums die Wasserstoffvorräte im Zentralbereich. Nach dem Verlassen der Hauptreihe verläuft die weitere Entwicklung je nach Sternmasse sehr unterschiedlich.

Zunächst wird die Entwicklung am Beispiel unserer Sonne dargestellt; sie gilt für Sterne mit sonnenähnlicher Masse entsprechend.

Im Zentralbereich der Sonne werden je Sekunde etwa 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium fusioniert, wobei ca. $9 \cdot 10^{37}$ Fusionsprozesse ablaufen. Das bedeutet, dass im Zentralbereich die Wasserstoffkonzentration sehr langsam abnimmt, während die Heliumkonzentration zunimmt. Im Verlauf von etwa zehn Milliarden Jahren hat sich im Zentralbereich ein Heliumkern gebildet, die Wasserstofffusion ist hier erloschen und durch die ausbleibende Energiefreisetzung kontrahiert der Kern. Die dadurch frei werdende Gravitationsenergie führt zu einem Temperaturanstieg und bringt in einem Bereich, der den Kern umgibt, die Wasserstofffusion wieder in Gang. Die Wasserstoffbrennzone ist sozusagen nach außen gewandert. Die jetzt in Form von Strahlung freigesetzte Energie drückt die Hülle nach außen, zugleich sinkt die Oberflächentemperatur.



Die Sonne hat sich zu einem Roten Riesen mit einem Durchmesser von etwa 0,4 AE entwickelt. Schließlich kommt es im Zentralbereich schlagartig zum Einsetzen der Heliumfusion. Für die relativ kurze Zeit des „Heliumbrennens“ (ca. 100 000 Jahre) stellt sich noch einmal ein stabiler Zustand ein. Anschließend expandiert die Sonne erneut. Sie wird einen Durchmesser erreichen, der größer als der heutige Erdbahndurchmesser ist. Allerdings setzt im Kern kein weiterer Fusionsprozess mehr ein.

Wenn bei *massereichen Sternen* (das sind Sterne mit Anfangsmassen ab etwa $10 M_{\odot}$) der Wasserstoffvorrat im Zentralbereich zu Ende geht, kontrahiert dieser sehr stark und heizt auf Temperaturen von über 10^8 K auf. Dadurch wird im Kern das Heliumbrennen eingeleitet und das Wasserstoffbrennen in eine Zone um den Kern verlagert. Der Kreislauf Fusion – Erschöpfung der Kernbrennstoffe – Kontraktion – Aufheizung – Fusion wird nun mehrmals durchlaufen. Zündet im Kern ein neuer Fusionsprozess, schieben sich die bisherigen nach außen. Der Kern ist dann von innen nach außen mit unterschiedlichen Brennzonen umschlossen, man bezeichnet dies als *Schalenbrennen*. Alle Fusionsvorgänge, die nach dem Heliumbrennen kommen (Kohlenstoffbrennen, Sauerstoffbrennen, Siliziumbrennen), laufen aufgrund geringer Energieausbeute sehr schnell ab. Eine Grenze ist mit der Fusion zu Eisen erreicht, da sich nur bis zur Kernladungszahl 26 aus einer Fusion ein Energiegewinn ergibt.

Die gravierenden Veränderungen im Energiehaushalt führt bei Riesensternen zu mechanischen Instabilitäten, die sich in Form von radialen Schwingungen des Sterns und damit verbundenen Helligkeitsschwankungen äußern. Man kann das im Unterricht an dieser Stelle

kurz erwähnen, wird aber erst im Zusammenhang mit der Entfernungsbestimmung von Galaxien genauer auf die *Pulsationsveränderlichen* eingehen.

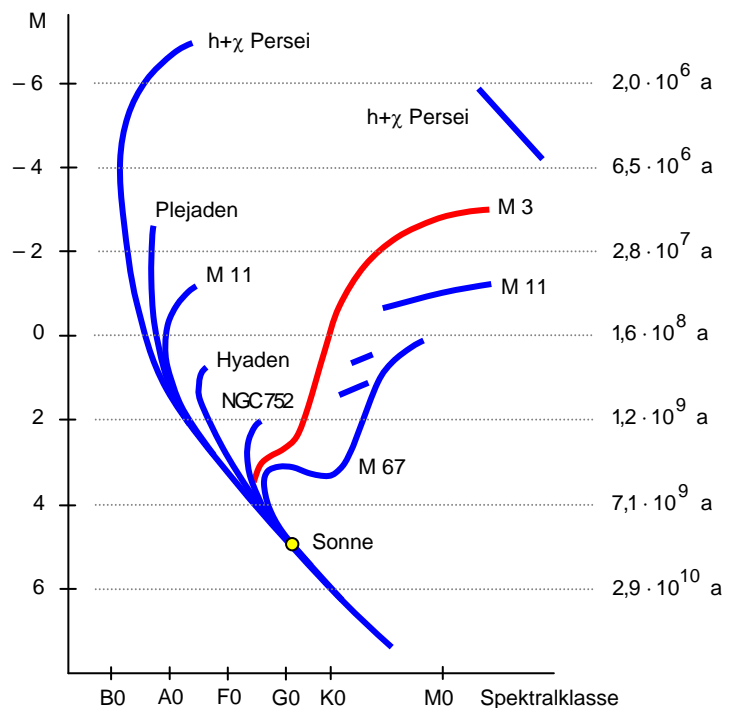
Das Alter von Sternhaufen

In den Hertzsprung-Russell-Diagrammen von als jung erkannten offenen Sternhaufen (zum Beispiel $h+\gamma$ Persei, die Plejaden, M11) ist die Hauptreihe relativ gleichmäßig besetzt, jedoch nur bis hinauf zu einer bestimmten Stelle, ab der sich ein „Schwenk“ nach rechts abzeichnet. Meist finden sich dann im Bereich der Roten Riesen noch einige Bildpunkte von Sternen.

Das lässt sich so auslegen, dass die Sterne eines Haufens etwa zur gleichen Zeit aus der gleichen interstellaren Wolke entstanden und somit alle gleich alt sind. Aufgrund verschiedener Massen haben sie sich aber unterschiedlich schnell entwickelt, die massereicheren Sterne haben womöglich schon das Riesenstadium erreicht. Die „Abknickstelle“ ist so zu interpretieren, dass die dort befindlichen Sterne die Hauptreihe gerade nach rechts verlassen, ihr Hauptreihenstadium also eben beenden. Das *Alter eines Sternhaufens* ist somit etwa gleich der *Verweildauer dieser Sterne*.

Legt man für verschiedene Sternhaufen die HR-Diagramme aufeinander (vgl. Diagramm rechts), sieht man deutlich, dass die Abknickstellen mit zunehmendem Alter der Sternhaufen immer weiter unten liegen. An der „Altersskala“ lässt sich anhand der Abknickstelle das Alter des jeweiligen Sternhaufens grob ablesen.

Der offene Sternhaufen M67 und der Kugelsternhaufen M3 haben bereits ein relativ hohes Alter, dementsprechend weisen sie deutlich ausgeprägte Riesenäste auf.



Ergänzungen

- a) Bei sonnenähnlichen Sternen bis zu etwa $1,5 M_{\odot}$ ist im Hauptreihenstadium der Proton-Proton-Prozess der maßgebliche Fusionsvorgang. Die Energie wird nur durch Strahlung nach außen transportiert, eine Konvektion ist wegen der hohen Dichte des Zentralbereichs nicht möglich. Erst in den äußeren Schichten erfolgt der Energietransport durch Konvektion.

- b) Nur bei den sonnenähnlichen Sternen kommt es zum *Helium-Flash*, also dem schlagartigen Einsetzen des Heliumbrennens. Hierzu ist eine Kern-Mindestmasse von etwa $0,45 M_{\odot}$ erforderlich. Dabei wird im Zentrum des Sterns für einige Sekunden eine Leuchtkraft von ca. $10^{10} L_{\odot}$ erreicht. Die Energie wird im wesentlichen von der Sternhülle absorbiert, so dass der Flash nach außen hin praktisch keine Auswirkungen zeigt.
- c) Die Dichte im Zentralbereich ist bei den sonnenähnlichen Sternen so hoch, dass sich die Materie, insbesondere das Elektronengas, nicht mehr wie ein ideales Gas verhält. Man bezeichnet den Zustand als *entartet*. Die Ursache sind quantenphysikalische Effekte. Unter anderem hängt bei entarteter Materie der Druck nicht mehr von der Temperatur ab. Die Entartung des Elektronengases spielt eine wesentliche Rolle für das Einsetzen des Helium-Flashes.
- d) Bei massereicheren Sternen dominiert im Hauptreihenstadium infolge der höheren Kerntemperaturen der CNO-Zyklus. Die im Kern freigesetzte Energie ist so groß, dass Strahlung alleine nicht ausreicht, um sie nach außen abzuführen. Als weiterem Mechanismus kommt der Konvektion im Kern hohe Bedeutung zu, die hier aufgrund der geringen Dichte möglich ist. Dagegen kann in den äußeren Bereichen die gesamte Energie durch Strahlung abtransportiert werden, in der Hülle ist bei diesen Sternen also Konvektion nicht erforderlich.
- e) Bei den massereichen Sternen kommt es beim Verlassen der Hauptreihe aufgrund der konvektiven Durchmischung des Kernmaterials nicht zur Entartung des Elektronengases, auch einen Helium-Flash gibt es nicht. Die Dichte des Zentralbereichs ist bei diesen Sternen relativ gering. Bei dessen Kontraktion setzen sie deshalb in viel höherem Ausmaß, als dies bei den massearmen Sternen möglich ist, Gravitationsenergie in innere Energie um und erreichen so Kerntemperaturen von über 10^8 K. Das Heliumbrennen setzt allein dadurch ein.
- f) Sehr massearme Sterne mit weniger als etwa $0,45 M_{\odot}$ haben eine extrem lange Verweildauer auf der Hauptreihe. Keiner von ihnen kann seit der Entstehung des Universums ein Endstadium erreicht haben. Also gibt es auch keine Beobachtungsdaten zur Überprüfung theoretischer Überlegungen. Sicher ist, dass sie das Heliumbrennen nicht zünden können und als Heliumkugeln langsam auskühlen.
- g) Der Übergang vom Hauptreihen- in das Riesenstadium erfolgt gerade bei den massereichen Sternen verhältnismäßig schnell. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit, Sterne in diesem Übergangsstadium zu beobachten, recht gering. Folglich gibt es im HRD zwischen der Hauptreihe und dem Riesenast einen Bereich, in dem kaum Bildpunkte von Sternen zu finden sind. Dieser Bereich wird als *Hertzprung-Lücke* bezeichnet.

Spätphasen und Endzustände

Die Fusionsprozesse im Inneren eines Sterns nehmen ein Ende, wenn Druck und Temperatur für ein Zünden der nächsten Fusionsstufe zu niedrig sind oder die Stufe eines Eisenkerns erreicht ist. In dieser Phase geben Sterne in erheblichem Umfang Materie nach außen ab.

Sowohl die „Startmasse“ eines Sterns als auch das Ausmaß seines Masseverlustes bestimmen letztlich, ob er als *Weißer Zwerg*, als *Neutronenstern* oder gar als *Schwarzes Loch* enden wird.

Massenverlust und Planetarische Nebel

Wie sich am Beispiel des Sonnenwindes nachvollziehen lässt, geben Sterne in Form von *Sternwinden* immer etwas Materie ab. In der Spätphase des Riesenstadiums werden diese Sternwinde, hervorgerufen durch den Strahlungsdruck aus dem Sterninneren, jedoch so stark, dass sie oft zu einem deutlichen Verlust von Hüllenmaterie führen. Dabei werden auch Elemente, die schwerer als Helium sind, in den interstellaren Raum transportiert.

Bei *massearmen Sternen* (das sind Sterne mit Anfangsmassen von weniger als 7 bis 8 M_{\odot} bis herunter zu etwa $0,5 M_{\odot}$) können komplexe Vorgänge zum Abstoßen der gesamten, nur noch locker an den Stern gebundenen Außenhülle führen. Dieser Vorgang geht relativ „gemächlich“ vor sich. Sichtbare Belege hierfür sind die oft farbenprächtigen *Planetarischen Nebel*.

Zu den eindrucksvollen Beispielen gehören u. a. der Ringnebel im Sternbild Leier (M 57 bzw. NGC 6720), der Helixnebel im Sternbild Wassermann (NGC 7293), der Katzenaugennebel (NGC 6543) im Sternbild Drache sowie der Eskimo-Nebel (NGC 2392) im Sternbild Zwillinge.

Nach dem Ausstoß der Nebelmaterie hat der verbleibende Zentralstern eine sehr hohe Oberflächentemperatur. Die von ihm emittierte UV-Strahlung heizt die abgestoßene Hülle auf und regt sie für einige 10^4 Jahre, das ist ein verhältnismäßig kurzer Zeitraum, zum Leuchten an. Die Dichte des Nebelgases nimmt mit zunehmender Expansion kontinuierlich ab, bis der Nebel schließlich nicht mehr beobachtbar ist. In der Zwischenzeit entwickelt sich der Zentralstern zu einem Weißen Zwerg.

Weißer Zwerge

Massearme Sterne enden als Weiße Zwerge. Da massearme Sterne den weitaus größten Teil der Sterne ausmachen, kommt dieser Endzustand am häufigsten vor.

Ein Weißer Zwerg geht aus dem Zentralgebiet eines Riesensterns hervor, der seine Außenhülle abgestoßen hat. Dabei ist entscheidend, wie viel Masse abgestoßen wurde. Der Reststern erfährt infolge Abkühlung einen Gravitationskollaps. Nur wenn die Restmasse unter $1,4 M_{\odot}$ liegt, wird dieser Kollaps gestoppt. Der Druck des Elektronengases hält dann dem enormen Schweredruck das Gleichgewicht. Die $1,4$ Sonnenmassen bilden also eine Obergrenze für die Entstehung Weißer Zwerge. Ihre typische Masse liegt bei $0,6 M_{\odot}$, und mit Durchmessern im Bereich von $0,01$ Sonnendurchmessern (etwa Erdgröße) ergeben sich enorme Dichtewerte um $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Zunächst sind Weiße Zwerge durch die beim Gravitationskollaps frei werdende Energie sehr heiß. Sie kühlen aber durch Energieabstrahlung langsam aus und ändern dabei ihren Farbeindruck von weiß über gelb, orange zu rot, bis sie schließlich als „schwarze Zwerge“ nicht mehr beobachtbar sind. Aufgrund der kleinen Oberfläche kann das viele Millionen bis Milliarden Jahre dauern.

Der erste Weiße Zwerg wurde 1862 von Alvan G. Clark entdeckt: Sirius B, der Begleitstern von Sirius. Mit einer Masse von $0,98 M_{\odot}$ und einem Radius von etwa

$0,0086 R_{\odot} \approx 6\,000 \text{ km}$ hat er eine mittlere Dichte von rund $2\,000 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$. Die Masse einer mit Materie von Sirius B gefüllten Tasse (100 ml) wäre so groß wie die Startmassen von drei mittleren Passagierflugzeugen zusammen.

Mittlerweile sind knapp 1 000 Weiße Zwerge bekannt.

Ergänzung

Bei sonnenähnlichen Sternen liegt der Masseverlust durch Sternwinde bei etwa $10^{-14} M_{\odot}$ pro Jahr, was im Vergleich zur Gesamtmasse unerheblich ist. Bei weit entwickelten Riesensternen mit hoher Leuchtkraft und geringer Oberflächentemperatur kann dieser Massenausstoß jedoch Werte von $10^{-4} M_{\odot}$ pro Jahr annehmen (die Sonne hätte sich bei einer derartigen Rate schon in 10 000 Jahren „aufgelöst“).

Neutronensterne

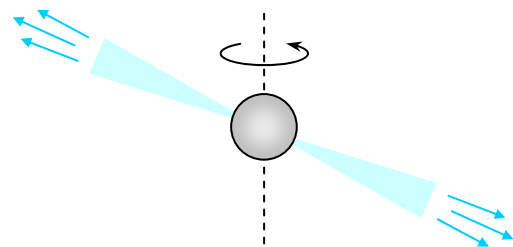
Bei massereichen Sternen verbleibt nach dem Massenverlust sehr wahrscheinlich ein Reststern mit mehr als $1,4 M_{\odot}$. In diesem Stadium wird der Zentralbereich des Reststerns instabil und kollabiert praktisch im freien Fall, auch das Elektronengas kann diesen Kollaps nicht mehr stoppen. Die Elektronen werden in die Atomkerne gepresst und sie reagieren dort mit den Protonen: $p^{+} + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$. Es bilden sich sowohl Neutronenmaterie als auch unzählige Neutrinos. Aus dem Zentralbereich ist ein *Neutronenstern* entstanden und die verbleibende Sternhülle wird in Form einer *Supernova*-Explosion abgestoßen.

Auch für die Entstehung eines Neutronensterns gibt es eine Massenobergrenze, seine Masse darf etwa 2 bis $3 M_{\odot}$ nicht überschreiten. Dann halten sich in dem Stern der Gravitationsdruck und der Druck der Neutronenmaterie das Gleichgewicht.

Neutronensterne haben einen typischen Durchmesser von 10 bis 30 km. Die Dichte nimmt einen kaum mehr vorstellbaren Wert um 100 Millionen Tonnen je Kubikzentimeter an (Atomkerndichte).

Die Theorie zu den Neutronensternen wurde bereits 1938 entwickelt. Die Frage war, ob es diese Sterne auch in Wirklichkeit gibt. 1967, also rund 30 Jahre später, wurden im Sternbild Vulpecula bei der Untersuchung von Radiostrahlung zufällig Signale entdeckt, die in gepulster Form mit einem präzisen zeitlichen Abstand von 1,337 Sekunden auf der Erde ankamen. Die ursprüngliche Vermutung, es handle sich um die Botschaft außerirdischer Intelligenz, wurde schnell verworfen, da man bald weitere Quellen dieser Art, *Pulsare* genannt, finden konnte. Der Name Pulsar hat nichts mit pulsieren zu tun, sondern drückt aus, dass die Strahlung gepulst bei uns ankommt.

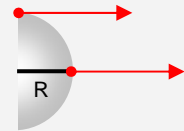
Tatsächlich stammen diese Signale von Neutronensternen. Da der Drehimpuls des ursprünglichen Zentralbereichs beim Kollaps erhalten bleibt (Pirouetteneffekt), müssen Neutronensterne zum einen außerordentlich schnell rotieren. Zum anderen wird beim Kollaps mit der Materie auch das vorhandene Magnetfeld komprimiert, so dass Neutronensterne äußerst starke Magnetfelder besitzen. Elektronen, die in diese Magnetfelder gelangen, werden extrem beschleunigt und geben dabei in einem engen kegelförmigen Bereich elektromagnetische Strahlung ab. Die beiden Strahlungskegel verlaufen bei einem Pulsar schräg zur Rotationsachse. Wird die Erde von einem rotierenden Strahlungskegel (ähnlich dem Leuchtfener eines Leuchtturms) getroffen, lässt sich die ankommende Strahlung registrieren. Die periodischen Strahlungsimpulse wurden inzwischen auch im optischen Bereich bis hin zum Röntgenstrahlungsbereich beobachtet. Genaue Messungen ergeben, dass die Rotationsdauern mit der Zeit größer werden. Dies kann nur so gedeutet werden, dass die abgestrahlte Leistung letztlich der Rotation entzogen wird.



Mittlerweile sind über 1 000 Pulsare bekannt. Ein Beispiel ist der Pulsar im Zentrum des Crab-Nebels. Man schätzt jedoch, dass es in unserer Milchstraße rund 500 000 Pulsare gibt.

Ergänzung

Der Radius eines Pulsars lässt sich abschätzen. Hierzu ist folgende Vorüberlegung hilfreich. Könnte man die Sonne wie eine Glühlampe plötzlich abschalten, würde sich für einen Erdbeobachter zunächst in der Mitte der Sonnenscheibe, also an der der Erde nächstliegenden Stelle, eine kleine schwarze Kreisscheibe bilden. Diese dehnt sich zum Sonnenrand hin aus und erreicht ihn erst nach 2,3 Sekunden, da er $7 \cdot 10^5$ km weiter von der Erde entfernt ist, als die Mitte der uns zugewandten Sonnenhalbkugel. Die Verdunklungsdauer ergibt sich also genau aus dem Sonnenradius.



Diese Überlegung gilt es jetzt auf einen Pulsar zu übertragen. Wird die Erde von dem äußerst engen Strahlungskegel des Pulsars getroffen, so kommt dies einem „An- und Abschalten“ der Strahlung gleich. Das extrem kurze Signal „verschmiert“ jedoch aufgrund der obigen Überlegung zeitlich. Beträgt die Signalbreite zum Beispiel 0,2 ms, was einer „Abschaltedauer“ von 0,1 ms entspricht, so ergibt sich daraus für den Pulsar ein Radius von rund 30 km.

Die folgende Darstellung dient der Veranschaulichung von Größenverhältnissen. Es werden jeweils die Durchmesser der Objekte verglichen.



Schwarze Löcher

Überschreitet nach der Massenabgabe der Reststern die Massengrenze für Neutronensterne, so kann aufgrund theoretischer Überlegungen auch das Neutronengas einen weiteren Kollaps nicht mehr aufhalten. Im Zeitraum von Millisekunden fällt die neutronisierte Materie zu einem superkompakten Objekt zusammen, das man als *Schwarzes Loch* bezeichnet. Der Name kommt daher, dass innerhalb einer bestimmten Distanz (dem Schwarzschild-Radius) weder materielle Teilchen noch elektromagnetische Strahlungsquanten der Gravitationsanziehung des Objekts entkommen. Es ist also nicht möglich, von einem Schwarzen Loch (genauer: von den Vorgängen innerhalb seines Schwarzschild-Radius) Informationen zu erhalten.

Der Schwarzschild-Radius ergibt sich aus der folgenden, recht plausiblen Überlegung: Im Ausdruck für die Fluchtgeschwindigkeit $v_F = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$ wählt man als Grenzfall die Lichtgeschwindigkeit c und löst nach dem Radius, jetzt R_S genannt, auf. So erhält man

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}.$$

Eine exakte Behandlung erfordert die Berücksichtigung der allgemeinen Relativitätstheorie, liefert aber das gleiche Ergebnis. Für ein Schwarzes Loch mit $3 M_\odot$ erhält man $R_S \approx 9 \text{ km}$, für ein Objekt mit Erdmasse würde der Schwarzschild-Radius 9 mm betragen.

Die bisher beschriebenen „stellaren“ Schwarzen Löcher haben Massen zwischen etwa drei und 50 Sonnenmassen. Ob die extrem massereichen Schwarzen Löcher mit einigen Millionen Sonnenmassen, wie man sie im Zentrum unserer Milchstraße und anderer Galaxien vermutet, auch durch den oben beschriebenen Prozess entstanden sind, ist noch völlig unklar.

Auch wenn ein Schwarzes Loch nicht „direkt sichtbar“ ist, kann es sich trotzdem indirekt, also über seine Gravitationswirkung, bemerkbar machen. So lässt sich unter Umständen über den Nachweis von Röntgenstrahlung, die dadurch entsteht, dass Materie in ein Schwarzes Loch stürzt, auf ein derartiges Objekt schließen.

Supernovae

Hier handelt es sich um die spektakulärste Erscheinung in der Endphase eines Sterns, bei der große Mengen an Sternmaterie in das Universum geschleudert werden. Man unterscheidet heute zwei grundsätzlich verschiedene Mechanismen für die Entstehung von Supernovae.

Die Vorgänge bei einer „thermonuklearen Supernova“ (sie entspricht dem *Supernova-Typ Ia*) sind mittlerweile recht gut verstanden. Der Theorie zufolge tritt ein Ausbruch dieser Art ein, wenn auf einen Weißen Zwerg, der zu einem engen Doppelsternsystem gehört, vom Begleitstern Materie „abregnet“ und dabei die Massengrenze für Weiße Zwerge überschritten wird. Bei der nachfolgenden Kontraktion setzen schlagartig Fusionsprozesse von Kohlenstoff und Sauerstoff ein, die zur Explosion des gesamten Sterns führen. Ein Reststern bleibt nicht übrig.

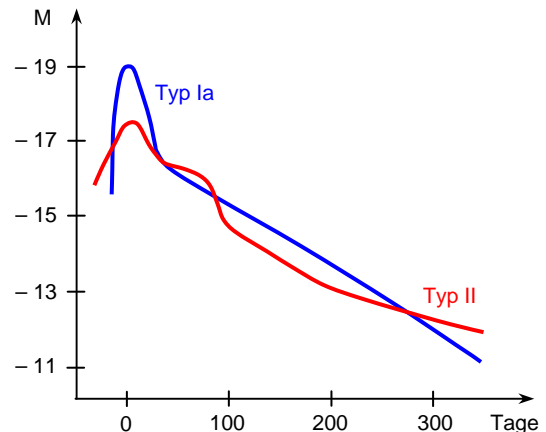
Weil bei Supernovae vom Typ Ia zu Beginn des Prozesses die Massen annähernd gleich groß sind, wird auch immer etwa die gleiche Energiemenge von 10^{45} J freigesetzt. Aus diesem Grund sind auch die Leuchtkräfte sowie der Verlauf der Lichtkurven sehr ähnlich. Mit ca. 10^{10} Sonnenleuchtkräften und einer absoluten Helligkeit von $M \approx -19$ erscheint eine derartige Supernova fast so hell wie eine gesamte Galaxie.

Die physikalischen Vorgänge bei einer „Kollaps-Supernova“ (sie entspricht dem *Supernova-Typ II*) sind noch nicht wirklich zufriedenstellend verstanden. Vermutlich spielen zwei Prozesse eine entscheidende Rolle.

Einerseits erreichen Neutronensterne und natürlich erst recht Schwarze Löcher bei ihrem Gravitationskollaps eine extreme Kompaktheit. Die auf sie herabstürzende Restmaterie muss deshalb zurückprallen und es entstehen starke, nach außen gerichtete Stoßfronten. Sie dürften den entscheidenden Anteil an der Hüllenexplosion haben.

Andererseits entstehen bei der Bildung der Neutronenmaterie extrem viele Neutrinos. Sie können mehr oder weniger ungehindert entweichen und transportieren einen Großteil der freigegebenen Energie nach außen. Obwohl nicht einmal 10 % der Neutrinos ihre Energie an die darüber liegende Hüllenmaterie abgeben, tragen wohl auch sie erheblich zur Explosion der Hülle bei.

Die Ausgangsbedingungen bei Supernovae vom Typ II können sehr unterschiedlich sein, so dass hier die Werte für die freigesetzten Energien, für die Leuchtkräfte und die absoluten Helligkeiten deutlich streuen. Die nebenstehende Graphik zeigt den Helligkeitsverlauf nur schematisch.



Ergänzungen

- Supernovae werden als Auslöser für die Entstehung von Sternen in Gas- und Staubwolken vermutet. Die bei der Explosion erzeugten Stoßwellen könnten in dichteren Bereichen der Wolke den erforderlichen Druck für die weitere Kontraktion liefern.
- Die im Verlauf von Supernovae in den interstellaren Raum abgestoßene Materie ist teilweise in Form bizarrer Nebel beobachtbar. So ist zum Beispiel der Cirrus-Nebel (NGC 6992, Sternbild Schwan) Teil des Restes einer prähistorischen Supernova. Im südlichen Sternbild Segel (Vela) findet man die Überreste der Vela-Supernova, die sich vor etwa 11 000 Jahren ereignet hat. Zumindest von den galaktischen Supernova-Überresten geht auch eine mehr oder weniger intensive Radiostrahlung aus. Die „radiohellste“ Quelle in unserer Milchstraße und eines der am besten untersuchten Objekte ist der ca. 11 000 Lj entfernte SN-Überrest Cassiopeia A. Die zugehörige Supernova-Explosion war um das Jahr 1680 auf der Erde beobachtbar, Aufzeichnungen hierüber sind jedoch nicht bekannt.
- Innerhalb unserer Milchstraße sind für den Zeitraum der letzten 1 000 Jahre nur sechs Supernovae sicher nachgewiesen. So wird in alten chinesischen und japanischen Aufzeichnungen über einen „neuen Stern“ im Sternbild Stier berichtet, der im Jahr 1054 mit einer geschätzten Helligkeit von -5 für 23 Tage auch tagsüber zu sehen war und insgesamt zwei Jahre lang beobachtet werden konnte. An der beschriebenen Stelle findet man heute den bekannten Krabben-Nebel (M1), in dessen Zentrum sich ein sehr lichtschwacher, schnell rotierender Pulsar befindet. Neben Cas A haben sich auch die 1572 von Tycho Brahe und 1604 von Johannes Kepler beobachteten Ereignisse innerhalb der Milchstraße zugetragen.
- Die vermutlich bekannteste und am genauesten untersuchte Supernova (SN) ist die SN 1987A, die am 23. Februar 1987 in der 48 000 pc entfernten Großen Magellanschen Wolke entdeckt wurde. Mit einer scheinbaren Helligkeit von 2,8 war sie nach der Kepler-SN die erste, die mit bloßem Auge beobachtet werden konnte. Aus der scheinbaren Helligkeit und der Entfernung folgt zunächst eine absolute Helligkeit von $M = -15,6$. Bezieht man schließlich eine für den Lichtweg plausible Strahlungsabschwächung (*Extinktion*) mit ein, erhält man eine „bereinigte“ absolute Helligkeit von $M = -16,2$. Daraus ergibt sich eine Leuchtkraft von $2,5 \cdot 10^8 L_{\odot}$. Sowohl mit dieser Leuchtkraft als auch mit der eher ungewöhnlichen Lichtkurve weist diese SN doch einige Merkwürdigkeiten auf.

Etwa 3,8 Stunden vor der ersten optischen Wahrnehmung wurden von verschiedenen Forschergruppen charakteristische Neutrinos registriert. Damit wurden zum ersten Mal die beim Kollaps der Zentralregion theoretisch geforderten Neutrinos nachgewiesen.

Erstmals konnte bei dieser SN auch der Stern, aus dem sie hervorgegangen war (der *Progenitor*), im Zustand vor dem Ausbruch identifiziert werden. Es war ein blauer Überriese der Spektralklasse B3 (Oberflächentemperatur etwa 16 000 K) mit einer Masse von 15 bis 20 M_{\odot} . Die SN ist deshalb mit großer Sicherheit einer Unterklasse des Typs II zuzuordnen. Außerdem ist wenig wahrscheinlich, dass sich aus dem Zentralbereich des Progenitors ein Schwarzes Loch gebildet hat. Vielmehr kann man davon ausgehen, dass nach dem Kollaps ein Neutronenstern übrig geblieben ist. Ein Pulsar konnte jedoch bislang am Ort der SN nicht gefunden werden. Vielleicht trifft das vom entstandenen Pulsar ausgehende „Leuchfeuer“ die Erde nicht.

Leider war während der entscheidenden Phase keiner der hochempfindlichen Gravitationswellen-Detektoren in Betrieb. Die wohl einmalige Chance, Gravitationswirkungen der Schockwellenfront nachzuweisen, konnte deshalb leider nicht genutzt werden.

- e) Ein Kandidat für eine künftige SN in unserer näheren Umgebung könnte der 600 Lj entfernte Stern Beteigeuze (α Ori) sein. Abschätzungen zeigen, dass er bei einer SN-Explosion die scheinbare Helligkeit des Vollmondes erreichen würde.
- f) Die spektroskopischen Merkmale der verschiedenen Supernova-Typen und ihrer Unterklassen sollten im Unterricht nicht thematisiert werden.
- g) Bei der von SN-Überresten abgegebenen Radiostrahlung handelt es sich um Synchrotronstrahlung. Ein möglicher Entstehungsmechanismus dafür könnte sein, dass die bei der SN weggeschleuderte Materie auf bereits früher (im Riesenstadium) von dem Stern abgeworfene Materie trifft. Daraus resultiert ein komplexes Magnetfeld, in dem die Bewegung von Elektronen zur Abgabe der Synchrotronstrahlung führt.
- h) Eine wichtige Frage ist, ob sich eine SN in irgendeiner Form ankündigt. Theoretischen Überlegungen zufolge geht einer SN ein mehrere Minuten dauernder Strahlungsausbruch im Röntgenbereich voraus, was aber lange Zeit ohne Nachweis blieb. Am 9. Januar 2008 wurde in der Galaxie NGC 2770 mit dem Satelliten *Swift* ein derartiger Ausbruch registriert. In den Wochen darauf konnte mit Hilfe der Satelliten *Hubble* und *Chandra* tatsächlich bestätigt werden, dass auf den Strahlungsausbruch eine Sternexplosion (die SN 2008D) folgte. Damit konnte zum ersten Mal eine Supernova von deren Beginn an mitverfolgt werden. (Nachricht in www.astronews.com vom 22.05.2008)
- i) Abgesehen davon, dass sie sich nicht so spektakulär wie eine Supernova zeigt, läuft eine *Nova* auch nach einem ganz anderen Mechanismus ab. Hier ist ein enges Doppelsternsystem vorauszusetzen, bei dem sich ein Weißer Zwerg und ein normaler Hauptreihenstern umrunden. Aufgrund der geringen Distanz strömt Materie aus der Hülle des Hauptreihensterns (vorwiegend Wasserstoff) auf die Oberfläche des Weißen Zwergs, wobei sich dieser aufheizt. Die Temperatur kann so hoch werden, dass ein kurzzeitiges Wasserstoffbrennen einsetzt. Der Weiße Zwerg stößt dadurch die auf ihn „abgeregnete“ Materie explosionsartig ab und seine Helligkeit steigt innerhalb weniger Stunden um bis zu 15 Größenklassen an. Der plötzliche Helligkeitsanstieg wurde früher als Entstehung eines „neuen Sterns“ interpretiert und deshalb als „Nova“ bezeichnet. Ihre Helligkeit geht zunächst zügig und später immer langsamer zurück, bis nach etwa einem Jahr wieder die Ausgangshelligkeit erreicht ist. Da der Hauptreihenstern nach wie vor existiert, kann sich der Vorgang (sogar regelmäßig) wiederholen.
- j) Die Astronomen Kippenhahn und Weigert haben Mitte der 60er Jahre (20. Jahrhundert) die zeitliche Entwicklung enger Doppelsternsysteme untersucht. Von den beiden Komponenten, die ja gemeinsam entstanden sind, erreicht der massereichere, sich schneller entwickelnde Stern eine Phase mit größer werdendem Radius. Ab einer bestimmten Größe (dem *Roche-Volumen*) geht von diesem Stern Masse auf seinen Begleiter über und er entwickelt sich zu einem Weißen Zwerg. Die ursprünglich masseärmere Komponente ist durch diesen *Massenaustausch* zum massereicheren und unabhängig von seinem Alter noch wenig entwickelten Stern geworden. Ein Paradebeispiel hierfür ist das Sirius-System.
Enge Doppelsternsysteme sind auch hinsichtlich der Emission starker Röntgenstrahlung ausgesprochen interessante Objekte. Im Unterricht wird man auf die genannten Aspekte jedoch nur am Rande eingehen. Als weiterführende Literatur können beispielsweise [L15] oder [L4] empfohlen werden.

Zur Entstehung der Elemente

Die Entstehung von Wasserstoffatomen (Anteil ca. 77 %), Heliumatomen (Anteil ca. 23 %) und in geringfügigem Umfang auch Lithiumatomen geht auf die Frühphase des Universums zurück. In diesem Zeitraum waren jedoch die notwendigen Bedingungen für die Fusion zu Kohlenstoff oder noch höheren Elementen nicht gegeben.

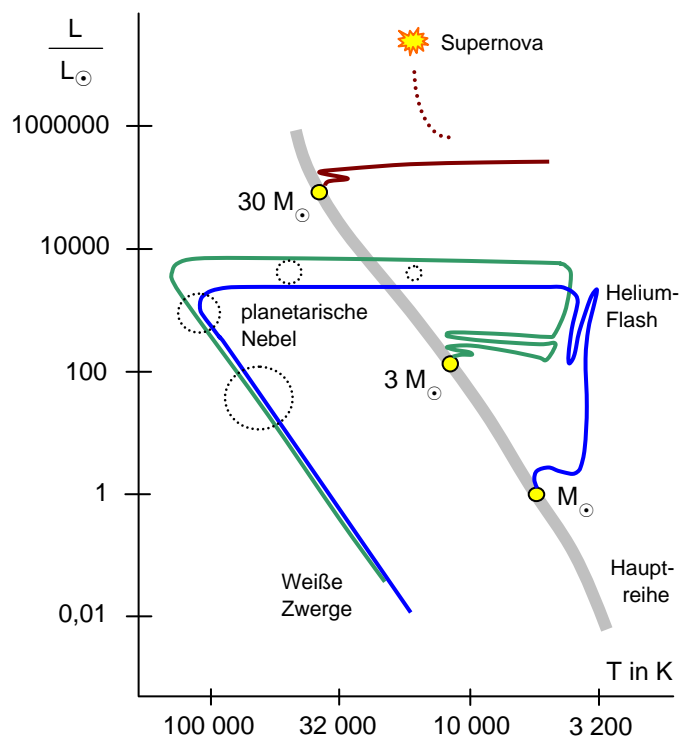
Die schwereren Elemente können also in kosmisch langen Zeiträumen nur durch Fusionsprozesse im Inneren massereicher Sterne und (innerhalb von Sekunden) bei Supernova-Explosionen entstehen. Die Existenz schwerer Elemente ist aber unabdingbare Voraussetzung für den Aufbau komplexer Verbindungen und damit letztlich für die Entstehung von Leben.

Sternentwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Im Verlauf der zeitlichen Entwicklung von Sternen verändert sich die Lage ihrer Bildpunkte im HRD.

Nebenstehend ist auf der Basis von Modellrechnungen der „Entwicklungsweg“ für drei Sterne unterschiedlicher Masse ab dem Beginn ihres Hauptreihenstadiums dargestellt.

Während sich ein Stern mit einer Sonnenmasse nach dem Riesenstadium direkt zum Weißen Zwerg entwickelt, durchlaufen etwas massereichere Sterne teils mehrfach den Bereich der Veränderlichen. Sterne mit sehr großer Masse entwickeln sich nach dem Überriesenstadium zu Supernovae.



Quellen und weiterführende Literatur:

Gondolatsch, Steinacker, Zimmermann, „Astronomie Grundkurs“, Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1990

Grehn, Krause, „Metzler Physik“, Westermann Schroedel Disterweg Schöningh Winklers, Braunschweig 2007

Herrmann, „Die Milchstraße“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003

Herrmann, Schwarz, „Astronomie Basiswissen Schule“, paetec, Berlin, Bibl. Institut, Mannheim 2001

Hillebrandt, „Supernovaexplosionen: ihre Rolle in Astrophysik und Kosmologie“, *Astronomie + Raumfahrt* 38 [2001] 6, S. 13 ff.

Keller, „Astrowissen“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003

Schönberner, Steffen, „Die letzten 100000 Jahre im Leben eines Sterns“, *Astronomie + Raumfahrt* 38 [2001] 6, S. 4 ff.

Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005

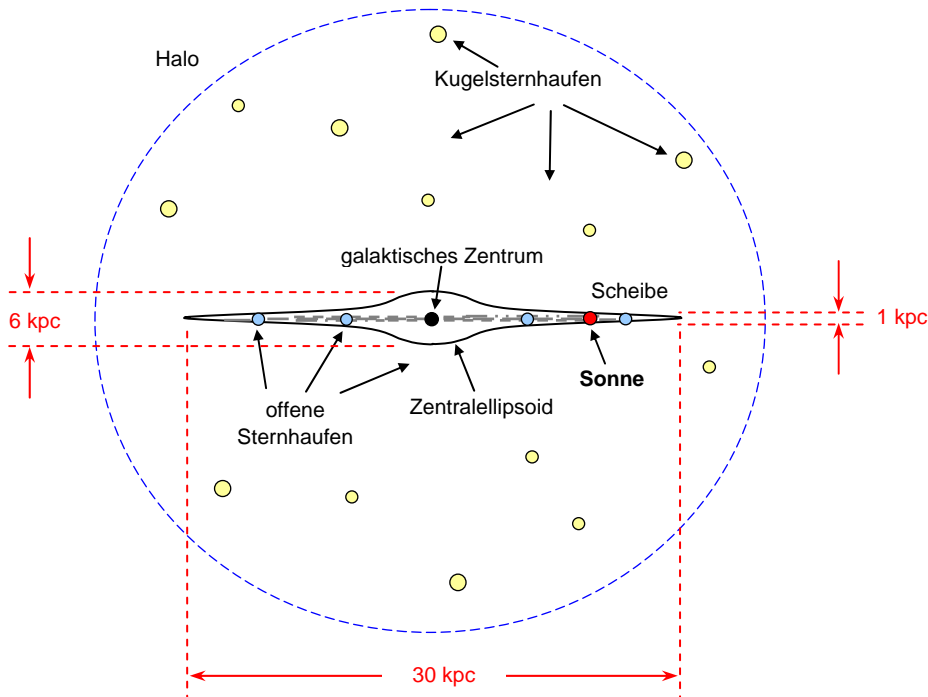
Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995

1.5 Großstrukturen im Weltall

Die Milchstraße als typische Galaxie

Beobachtet man abseits einer Großstadt in einer klaren, mondlosen Sommer- oder Herbstnacht den Sternhimmel, so lässt sich im Bereich der Sternbilder Schwan, Adler und Schütze deutlich das helle Band der Milchstraße erkennen. Bereits mit einem einfachen Fernglas zeigt sich eindrucksvoll, dass es sich dabei um eine Ansammlung unzählig vieler, schwach leuchtender Sterne handelt, die sich ungefähr längs eines Großkreises am Himmel konzentrieren.

Die Beobachtung unterstützt die Vorstellung, dass das Sonnensystem ungefähr in der Mittelebene einer relativ flachen Scheibe mit hoher Sterndichte besonders im Zentralbereich liegt. Photographien zeigen zusätzlich, dass diese Scheibe außer mit vielen Einzelsternen auch mit offenen Sternhaufen, leuchtenden Wasserstoffwolken sowie dunklen Gas- und Staubwolken angefüllt ist. Das Scheibenzentrum liegt im Sternbild Sagittarius. Dichte Dunkelwolken verwehren jedoch im optischen Bereich die direkte Sicht zu diesem Zentrum.



Bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts glaubte man, die Sonne befände sich nahe dem galaktischen Zentrum. Diese Auffassung musste revidiert werden, nachdem der Astronom Harlow Shapley 1918 Entfernungsmessungen an *Kugelsternhaufen* durchgeführt hatte. Er kam zu dem Erkenntnis, dass sich die Kugelsternhaufen in einem Raumgebiet befinden, das die Form eines annähernd kugelförmigen Rotationsellipsoids besitzt und dessen Zentrum mit dem der Galaxis zusammenfällt. Der Bereich wird als Halo der Milchstraße bezeichnet. Shapleys Messungen führten insbesondere zu dem Schluss, dass das Sonnensystem eher am Rand der Scheibe liegen muss, was auch mit der Beobachtung unterschiedlicher Sterndichten in der Richtung zum Sternbild Schütze bzw. in entgegengesetzter Richtung übereinstimmt.

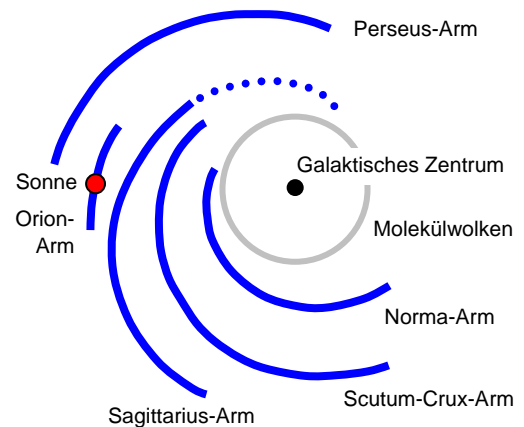
Im Jahr 1924 gelang es Edwin Hubble, im Randbereich des Andromedanebels Einzelsterne optisch aufzulösen. Er erkannte, dass seit langem bekannte Himmelsobjekte wie eben der Spiralnebel im Sternbild Andromeda (M 31) oder der Spiralnebel im Sternbild Jagdhunde (M 51) riesige scheibenförmige und weit entfernte Sternansammlungen außerhalb der Milch-

straße sind. Diese Ergebnisse legten nahe, dass es sich auch bei der Milchstraße um eine Spiralgalaxie handeln könnte.

Spiralstruktur und Rotation

1951 wurde die 21-cm-Radiostrahlung von interstellarem Wasserstoff entdeckt. Sie wird von kühlen Wasserstoffwolken, bestehend aus neutralem, atomarem Wasserstoff (sogenannte HI-Regionen), emittiert. Aus Messungen zur Dopplerverschiebung dieser Strahlung konnte zusammen mit der Annahme einer kreisförmigen Rotation ein erster Nachweis der Spiralstruktur der Milchstraße (Galaxis) erbracht werden. Spätere Untersuchungen der Emissionslinien von Molekülwolken, insbesondere der 2,6-mm-Strahlung von Kohlenmonoxid und die Beobachtung von jungen, offenen Sternhaufen, eingebettet in HII-Regionen (das sind heiße und daher ionisierte Wasserstoffwolken) haben zur derzeitigen Vorstellung von der Struktur der Galaxis und der Bewegung ihrer Teilbereiche geführt. Man sollte den Schülerinnen und Schülern in diesem Zusammenhang einerseits vermitteln, dass ständig an der Weiterentwicklung und Präzisierung der Vorstellungen gearbeitet wird. Andererseits wird die Bedeutung der Radioastronomie (aber auch die Notwendigkeit von Untersuchungen im Infrarot- und im Röntgenstrahlungsbereich) unmittelbar nachvollziehbar.

Man geht heute von einer Spiralstruktur mit mehreren Spiralarmen aus (wie viele, ist unsicher), die viele Verzweigungen und Verbindungsgebiete besitzt. Die nebenstehende schematische Darstellung zeigt einen Ausschnitt davon. Die derzeitige Vorstellung vom Aussehen der Milchstraße kommt der in Draufsicht zu sehenden Galaxie M83 nahe.



Der Perseus-Arm, der Sagittarius-Arm und der Orion-Arm (Lokaler Arm) sind mittlerweile etwas genauer bekannt. Aber auch hier sind wegen der eingelagerten Dunkelwolken nur Teilbereiche einer Untersuchung zugänglich.

Im Folgenden sind Ergänzungen zu den Komponenten des Milchstraßensystems aufgeführt. Von den Schülerinnen und Schülern werden Detailkenntnisse nicht erwartet.

Das galaktische Zentrum: Der Zentralbereich hat nur wenige pc Ausdehnung. Als eigentlicher Mittelpunkt gilt die starke Radioquelle Sagittarius A mit ihren drei Komponenten Sgr A-Ost, Sgr A-West und Sgr A*. Mit ca. 20 AE Durchmesser ist Sgr A* extrem kompakt und enthält mit großer Sicherheit ein schwarzes Loch mit grob $3 \cdot 10^6$ Sonnenmassen.

Das Zentrallipsoid: Diese zigarrenförmige Verdickung (*Bulge*) in den inneren 1 bis 2 kpc weist eine hohe Dichte an Sternen und interstellarer Materie auf. Von den Enden des Zentrallipsoids gehen die Spiralarme aus.

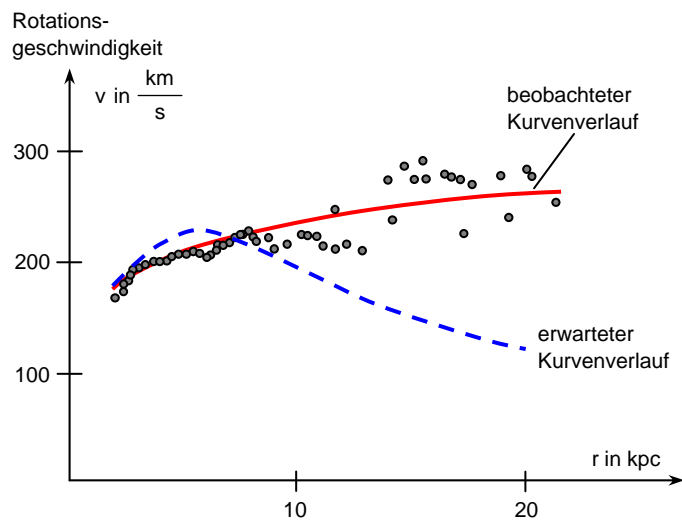
Die galaktische Scheibe: Sie enthält die Spiralarme, ihr Durchmesser beträgt ca. 30 kpc und die typische Dicke ist etwa 1 kpc. Die Sonne liegt etwa 15 pc nördlich der Hauptebene. Sie umrundet das Zentrum der Galaxis auf einer nahezu kreisförmigen Bahn mit ca. 8 kpc Radius. Die Umlaufdauer beträgt $230 \cdot 10^6$ Jahre.

Der Halo: Dieser nahezu kugelförmige Bereich um Scheibe und Zentral-ellipsoid hat einen Radius von grob 30 kpc, er enthält alte Kugelsternhaufen und RR-Lyrae-Sterne. Er nimmt nicht an der Rotationsbewegung der Scheibe teil.

Die Milchstraßenscheibe und der Halo werden von einem noch größeren, kugelförmigen Bereich mit etwa 100 kpc Durchmesser umgeben, der als Korona bezeichnet wird und nicht mehr zur eigentlichen Galaxis zählt. Dieser Bereich enthält neben sehr dünnem Wasserstoffplasma auch benachbarte Zwerggalaxien, darunter die beiden Magellanschen Wolken.

Spiralgalaxien müssen sich in Rotation befinden, sonst würden sie aufgrund der eigenen Gravitation in sich zusammenstürzen. Untersuchungen an Sternen im Umfeld der Sonne zeigen, dass sich diese auf nahezu kreisförmigen Bahnen um das galaktische Zentrum bewegen. Deshalb ist auch bei den anderen Sternen der Galaxis von einer derartigen Bewegung auszugehen.

Die Rotation um das Zentrum der Milchstraße erfolgt differenziell und ist infolge der komplexen Massenverteilung nicht mit der Planetenbewegung im Sonnensystem vergleichbar. Gerade neuere Messungen der Bahngeschwindigkeiten von Sternen zeigen deutliche Abweichungen von jenem Verlauf, den man für eine Konzentration der Masse der Galaxis hauptsächlich in ihrem Zentrum erwartet (→ schematisches Rotationsprofil; die Messwerte in den Außenbereichen sind sehr unsicher).



Zur Erklärung dieser Diskrepanz wird davon ausgegangen, dass sich nicht nur bei der Milchstraße, sondern bei allen Galaxien jenseits der äußeren sichtbaren Sterne erhebliche Massenansammlungen befinden. Da sich diese Materie der Sichtbarkeit entzieht, wird sie als *dunkle Materie* bezeichnet. Die physikalische Natur der dunklen Materie (ebenso die der postulierten *dunklen Energie*) ist momentan völlig unklar.

Ergänzungen

- Im Zusammenhang mit der Entstehung von Spiralstrukturen und deren offensichtlicher Stabilität gibt es viele interessante Fragen und Denkansätze, auf die im Unterricht nicht eingegangen werden kann. Für interessierte Lehrer wird auf die weiterführende Literatur (siehe unten) verwiesen.
- Zur Bedeutung der Radioastronomie

Die Erdatmosphäre ist nur für zwei Teilbereiche des ganzen elektromagnetischen Spektrums durchlässig. Durch das „optische Fenster“ gelangt Strahlung im Wellenlängenbereich von etwa 300 nm bis 2 000 nm ungeschwächt bis an die Erdoberfläche, das „Radiofenster“ lässt Strahlung mit Wellenlängen von etwa 1 mm bis 20 m ungehindert durch. Auf der Suche nach den Ursachen des Rauschens bei Telefon-Überlandleitungen entdeckte K. Jansky 1932 zufällig Radiostrahlung, die aus dem Sternbild Schütze (in dem das Milchstraßenzentrum liegt) kam. Ab 1940 entwickelte sich die Radioastronomie zu einer heute äußerst wichtigen Disziplin, die eine Reihe ganz wesentlicher Erkenntnisse hervorgebracht hat. Hierzu zählen vor allem:

- Das Sonnensystem (ruhige und aktive Sonne; Radiostrahlung der Planeten, vor allem Jupiter; Entfernungsbestimmung und Rotation der Objekte)

- Die interstellare Materie (neutrale und heiße Gaswolken)
Über die 21 cm-Linie ist der kühle und daher neutrale Wasserstoff, der den Hauptbestandteil der interstellaren Materie darstellt, direkt wahrnehmbar geworden, da der interstellare Staub die Radiobeobachtungen nicht behindern kann (im Gegensatz zur optischen Beobachtung). So erhielt man wichtige Aufschlüsse über die Anordnung und Geschwindigkeitsverteilung des neutralen Wasserstoffs in der Milchstraße und damit über deren Struktur. Auch die Entdeckung zahlreicher Moleküle im interstellaren Raum (Verbindungen von H, C, N und O) gehört in diesen Bereich.
- Radioobjekte innerhalb der Milchstraße (Überreste von Supernovae, Pulsare)
- Außergalaktische Systeme
Radiobeobachtungen haben die unsichtbaren und gänzlich unerwarteten Wesenszüge der Quasare, Radiogalaxien und explodierenden Kerne von Galaxien enthüllt. Da Radioemission auch dort entdeckt werden kann, wo optische Teleskope versagen, gibt es die Möglichkeit, Galaxieigenschaften in sehr großen Entfernungen – also während früher Phasen des Universums – zu untersuchen und die Struktur des Weltalls in großen Entfernungen zu bestimmen.

Die Forschungen basieren weitestgehend auf erdgebundenen Radioteleskopen. Das sind häufig große Parabolantennen, die ankommende Signale gebündelt zum Empfänger lenken. Das größte Radioteleskop der Welt hat einen Durchmesser von 300 m und liegt fest montiert in einem Talkessel in Arecibo (Puerto Rico). Zu den größten voll beweglichen Radioteleskopen gehört mit 100 m Durchmesser das des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg (in der Eifel, Deutschland). Im Kaukasus wurde mit 600 m Durchmesser der größte ringförmige Reflektor der Welt errichtet. Da auch bei derartig großen Reflektordurchmessern das Auflösungsvermögen wegen der verhältnismäßig großen Wellenlängen noch deutlich geringer als bei optischen Teleskopen ist, nutzt man die Interferenz von Signalen, die von sehr weit auseinanderliegenden Empfängern registriert werden. Computergestützt lassen sich so mittlerweile Winkelauflösungen in der Größenordnung von 0,001" erzielen.

Insgesamt kann man feststellen, dass die Verbindung von Radioastronomie und optischer Astronomie (unterstützt durch die Gebiete der Infrarot-, Röntgen- und Gammaastronomie) die Wissenschaft an eine neue Ära ihres Verständnisses des Universums herangeführt hat.

Quellen und weiterführende Literatur:

Herrmann, Die Milchstraße, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003, S. 132 ff., S. 177 ff.

Keller, Astrowissen, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003, S. 34 ff.

Weigert, Wendker, Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs, Wiley-VCH, Weinheim 2004, S. 29 ff.

Eine Abschätzung zur Masse der Milchstraße

Die sichtbare Masse der Milchstraße kann auf einfache Weise grob abgeschätzt werden. Dazu nimmt man an, dass sich ein Großteil der Materie der Galaxis auf eine Kugel mit Sonnenbahnradius beschränkt. Zusätzlich denkt man sich diese Masse im galaktischen Zentrum konzentriert.

Für die kreisförmige Bewegung der Sonne um das Zentrum gilt dann der Ansatz

$$\text{Gravitationskraft} = \text{Zentralkraft} \quad \text{bzw.} \quad G \cdot \frac{M_G \cdot M_S}{r^2} = M_S \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot r,$$

$$\text{woraus } M_G = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{r^3}{G} \approx 2 \cdot 10^{41} \text{ kg folgt.}$$

Somit erhält man für den vorausgesetzten Bereich eine sichtbare Masse der Milchstraße von etwa $100 \cdot 10^9$ Sonnenmassen.

Ergänzung

Im Rahmen einer aktuellen Studie zur Bestimmung der Gesamtmasse der Galaxis wurden die Geschwindigkeiten von Sternen untersucht, die sich im Bereich des Halos (also großräumig) um das Milchstraßenzentrum bewegen. Daraus ergab sich innerhalb eines Radius von 60 kpc eine Gesamtmasse von etwa $1000 \cdot 10^9$ Sonnenmassen.

Quelle: Staude, „Abgemagertes Milchstraßensystem“, Sterne und Weltraum, Juli 2008, S. 30 f.

Entfernungsbestimmung von Galaxien

Kenntnisse über die Entfernungen von Galaxien sind nicht nur zur Untersuchung ihrer räumlichen Verteilung im Kosmos unerlässlich. Man benötigt sie insbesondere, um Aussagen über die wesentlichen physikalischen Eigenschaften der Galaxien machen zu können.

Neben verschiedenen *Standardkerzen* (das sind bestimmte Einzelobjekte, deren Leuchtkräfte sich unabhängig von ihrer Entfernung ermitteln lassen) zählt die Hubble-Beziehung, die auf S. 101 genauer erläutert wird, zu den maßgeblichen Entfernungsindikatoren.

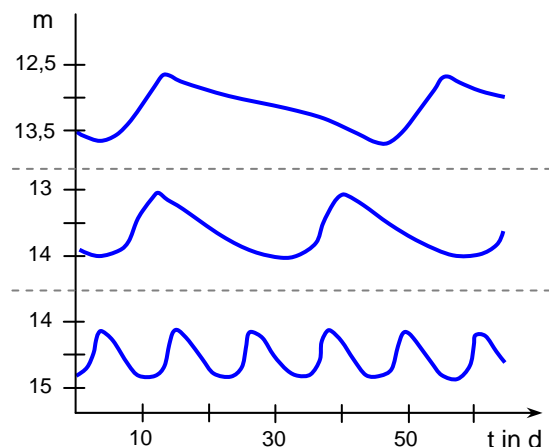
Cepheiden als Standardkerzen

Bei vielen Sternen kommt es in der verhältnismäßig kurzen Spätphase ihrer Entwicklung (wenn sie also das Hauptreihenstadium bereits hinter sich, das Erreichen eines Endzustandes aber noch vor sich haben) zu auffälligen Helligkeitsänderungen. Bei einem Teil der Sterne äußern sich diese in periodischen Schwankungen der Helligkeit, die nicht auf gegenseitige Bedeckungen in einem Doppelsternsystem zurückzuführen sind, sondern auf ein Pulsieren, das heißt auf radiale Schwingungen des gesamten Sterns. Bei diesen *Pulsationsveränderlichen* (nicht zu verwechseln mit den Pulsaren, die ihren Namen von der bei uns gepulst ankommenden Strahlung haben) werden abhängig von der Pulsationsperiode eine ganze Reihe verschiedener Typen unterschieden. Für den Unterricht ist es völlig ausreichend, sich auf die klassischen δ Cephei-Sterne (kurz *Cepheiden*) zu beschränken. Die Cepheiden gehören zwar nicht zu den häufigsten Veränderlichen, sie werden in Bezug auf die Entfernungsbestimmung jedoch als besonders wichtig eingestuft.

Cepheiden sind Riesensterne, die teilweise mehr als die 10 000-fache Leuchtkraft unserer Sonne haben und deshalb auch noch gesehen werden können, wenn sie weit entfernt sind. Sie zeichnen sich durch sehr regelmäßige Helligkeitsänderungen mit Perioden zwischen 2 und 50 Tagen (typisch sind 5 Tage) aus. Die unmittelbare Ursache der Helligkeitsschwankungen ist eine periodische Änderung der Oberflächentemperatur, die mit einer entsprechenden Änderung des Spektraltyps und des Sternradius einhergeht.

Bei der Aufzeichnung und Auswertung der Helligkeitskurven von 25 Cepheiden der *Kleinen Magellanschen Wolke* konnte Henrietta Leavitt 1912 eine wichtige Entdeckung machen: Die Sterne mit einer größeren mittleren Helligkeit sind auch diejenigen mit dem längeren Variationszyklus.

In der nebenstehenden Skizze ist die scheinbare Helligkeit von drei δ Cephei-Sternen der Klei-



nen Magellanschen Wolke in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Eine genauere Untersuchung lässt recht gut einen linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Periodendauer und der mittleren scheinbaren Helligkeit von Cepheiden erkennen. Da alle Sterne der Kleinen Magellanschen Wolke im Wesentlichen gleich weit vom Sonnensystem entfernt sind und damit etwa den gleichen Entfernungsmodul besitzen, korreliert deshalb auch die mittlere absolute Helligkeit mit der Periodendauer.

Ist M die mittlere absolute Helligkeit und p die Periodendauer in Tagen, so gilt

$$M = -1,67 - 2,54 \cdot \lg\left(\frac{p}{1d}\right) \quad (*)$$

Diese Perioden-Helligkeits-Beziehung konnte mit Cepheiden innerhalb der Milchstraße, deren Entfernung bereits bekannt war, geeicht werden.

Damit hat man ein praktikables Verfahren zur Bestimmung von großen Entfernungen zur Hand. Ist die Periodendauer eines Cepheiden in einem Objekt außerhalb der Galaxis bekannt, lässt sich mit (*) die mittlere absolute Helligkeit des Sterns berechnen. Zusammen mit seiner scheinbaren Helligkeit folgt aus $r = 10^{0,2 \cdot (m-M)} \cdot 10 \text{ pc}$ auch seine Entfernung (und damit die Entfernung des Objekts). Da die scheinbaren Helligkeiten von δ Cephei-Sternen etwa zwischen -2 und -5 liegen und ihre absoluten Helligkeiten Werte bis zu -7 annehmen können, ergibt sich für diese Methode eine Reichweite von bis zu 25 Mpc.

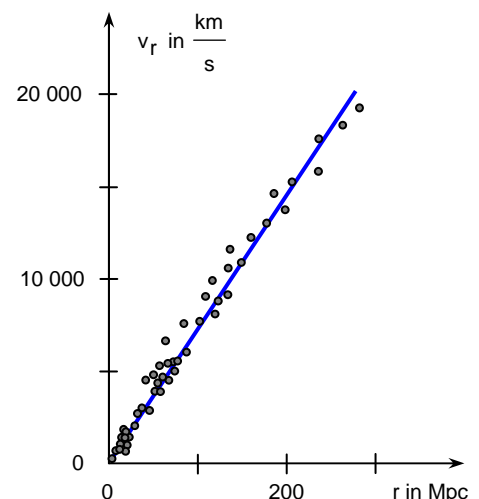
Supernovae als Standardkerzen

Um Entfernungen größer als die Reichweite der Cepheiden-Methode bestimmen zu können, benötigt man extrem leuchtkräftige Objekte. Hierzu zählen Supernovae vom Typ Ia, deren Entstehung bereits behandelt wurde.

Da bei einer Supernova vom Typ Ia fast immer die gleiche Energiemenge frei wird, ist auch der Leuchtkraftanstieg auf ungefähr 10^{10} Sonnenleuchtkräfte stets etwa gleich groß. Das macht die Supernovae vom Typ Ia insbesondere für die Entfernungsbestimmung von Galaxien zu wichtigen Standardkerzen. Ein Nachteil ist, dass sie sich nicht allzu oft ereignen. Bislang konnten einige hundert derartige Explosionen beobachtet werden.

Radialgeschwindigkeit von Galaxien und Hubble-Beziehung

In den Jahren 1924 bis 1929 konnte Edwin Hubble mit Hilfe von Cepheiden und anderen Indikatoren die Entfernungen von 24 Galaxien grob abschätzen. Außerdem hat Vester Slipher in den Jahren 1912 bis 1924 systematisch die Wellenlängenverschiebungen von Spiralnebeln untersucht und die radialen Geschwindigkeiten vermessen, mit denen sie sich auf uns zu bzw. von uns weg bewegen. Dabei stellte er fest, dass sich die meisten dieser Galaxien von der Milchstraße weg bewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie davon entfernt sind. Die ermittelten Radialgeschwindigkeiten haben sich auch in vielen späteren Messungen (u. a. von Hubble) als direkt proportional zur Entfernung der Galaxien erwiesen.



Das führt unmittelbar auf das nach Hubble benannte Gesetz $v_r = H_0 \cdot r$.

H_0 ist die Hubble-Konstante, für deren Wert man heute von $70 \frac{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Mpc}}$ ausgeht (mit einer Unsicherheit zwischen $\pm 10\%$ und $\pm 15\%$).

Mit der Hubble-Beziehung steht ein idealer Entfernungskindikator für Galaxien zur Verfügung. Aus dem Spektrum einer Galaxie ermittelt man die Dopplerverschiebung $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$, woraus die Radialgeschwindigkeit v_r folgt und aus dieser wiederum die Entfernung der Galaxie.

Diese Vorgehensweise ist jedoch nur für $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \ll 1$ anwendbar.

Es wäre falsch, die von Slipher entdeckte „Fluchtbewegung“ der weiter entfernten Galaxien so zu interpretieren, als sei die Milchstraße das „Zentrum“ dieser Bewegung. Tatsächlich ist die Beobachtung auf die Expansion des gesamten Universums zurückzuführen (\rightarrow Kosmologie).

Die Fluchtbewegung macht sich erst bei großen Entfernungen ab 40 Mpc bemerkbar. Bei geringeren Distanzen überwiegt die gravitative Anziehung zwischen Galaxien.

So bewegt sich zum Beispiel die Andromedagalaxie mit etwa $120 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ auf die Milchstraße zu und wird in einigen Milliarden Jahren mit ihr kollidieren. Eine sehr schöne Simulation hierzu findet man unter <http://www.cita.utoronto.ca/~dubinski/tflops/> (Stand Juni 2008).

In diesem Zusammenhang ist es sicher nicht falsch, kurz die *Lokale Gruppe* zu erwähnen. Neben der Milchstraße, der Andromedagalaxie sowie der Triangulum-Galaxie gehören die beiden Magellanschen Wolken sowie nach momentanen Kenntnissen etwa 40 Zwerggalaxien zu diesem Galaxienhaufen. Die Distanzen der Haufenmitglieder zur Milchstraße liegen in den meisten Fällen unter 1 Mpc.

Beachtenswert ist, dass es sich beim Hubble-Gesetz um eine universelle Beziehung handelt, die unabhängig von der Art der Galaxie und der Beobachtungsrichtung gilt.

Ergänzungen

a) Auch zu Galaxien steht über Bücher oder das Internet reichhaltiges Bildmaterial zur Verfügung, das u. a. die verschiedenen Galaxientypen sehr schön zeigt. Jedoch wird im Unterricht eine systematische Klassifizierung der Galaxien aus Zeitgründen nicht möglich sein.

b) Entfernungsmessverfahren und „Entfernungsleiter“

Ausgangspunkt bei der Entwicklung astronomischer Methoden zur Angabe von Distanzen waren die Entfernungsmessungen im Sonnensystem (Parallaxenmessungen, später auch Radarmessungen).

Beim Übergang vom Sonnensystem zu Fixsternen in der Milchstraße wurden für nähere Sterne die trigonometrische Parallaxe und für weiter entfernte Sterne die *Sternstromparallaxe* (auch *Haufenparallaxe*) sowie die photometrische Parallaxe benutzt.

Ein entscheidender Fortschritt gelang mit der Entfernungsbestimmung mittels Cepheiden, die auch den Zugang zu außergalaktischen Objekten ermöglichte. Neben den Cepheiden werden eine ganze Reihe weiterer Typen veränderlicher Sterne zur Ermittlung von Distanzen herangezogen (zum Beispiel *RR Lyrae-Sterne*). Da sie aber in der Regel eine geringere Helligkeit als die Cepheiden aufweisen, kommt ihnen nicht deren Bedeutung zu. Den Cepheiden kommt insbesondere deshalb eine Schlüsselposition zu, weil mit ihnen die Eichung von Supernovae des Typs Ia möglich wurde.

Neben den schon genannten Standardkerzen kommen außerdem in Betracht:

- O-, B- und A-Überriesen; mit ihrer großen Helligkeit kommt man auf Entfernungen bis zu 10 Mpc,
- planetarische Nebel mit einer Reichweite von etwa 20 Mpc,
- hellste Galaxien in Galaxienhaufen; die Reichweite beträgt rund 1 Gpc.

Immer mehr Bedeutung gewinnt auch die sogenannte *Flächenhelligkeitsfluktuation*. Bei diesem Verfahren betrachtet man Bildelemente von Galaxien, die gerade noch eine Auflösung in Einzelsterne gestatten. Bei gleicher Gesamthelligkeit der Bildelemente hängt die Anzahl der gezählten Sterne von der Entfernung ab (je größer die Entfernung, desto mehr Sterne werden in dem Bildelement auch gezählt werden können). Die Methode hat eine Reichweite von etwa 50 Mpc.

Wie eben dargestellt, kommen für unterschiedliche Entfernungsbereiche unterschiedliche Bestimmungsverfahren zur Anwendung. Jedes Verfahren muss anhand geeigneter Objekte geeicht werden. Die Eichung beginnt mit der untersten Stufe (geringster Entfernungsbereich). Hat man hier zuverlässige Entfernungskenngrößen zur Verfügung, versucht man diese auch im anschließenden Entfernungsbereich zu finden, um das hier benutzte Verfahren zu eichen.

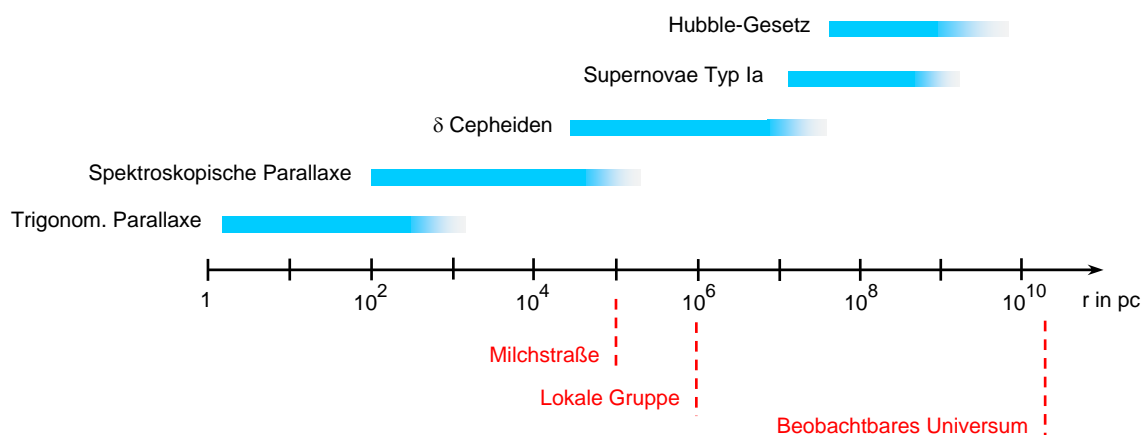
Die einzelnen Entfernungskenngrößen bauen also Schritt für Schritt aufeinander auf, so dass sich eine „Entfernungsleiter“ ergibt. Dies hat allerdings zur Konsequenz, dass sich Eichungsunsicherheiten in einer unten liegenden Stufe entsprechend ungünstig auf die Genauigkeit der darüber liegenden Stufen auswirken. Deshalb ist anzustreben, für jedes Verfahren mehrere, voneinander unabhängige Eichmethoden zu verwenden. In der Praxis weisen alle Verfahren mit zunehmender Reichweite erhebliche Unsicherheiten auf.

- c) Die lineare Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit von der Distanz wurde erstmals von G. Lemaître theoretisch hergeleitet. Hubble war der erste, der den heute nach ihm benannten Zusammenhang mit fundierten Messdaten belegt hat. Ursprünglich stand ihm dazu nur Datenmaterial von relativ nahen Systemen zur Verfügung. Die entfernteste Galaxie, die er beobachtete (M 60), war etwa 17 Mpc entfernt. Hubble ermittelte aus seinen Beobachtungen für H_0 einen Zahlenwert von etwa

$$500 \frac{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Mpc}}, \text{ der deutlich vom heute gängigen Wert abweicht.}$$

- d) Für sehr weit entfernte Galaxien und Quasare erhält man Rotverschiebungen von $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 1$ und größer. In diesem Fall führt auch die Verwendung der relativistischen Dopplerformel alleine nicht weiter. Die von diesen Objekten aufgezeichnete Strahlung wurde vor sehr langer Zeit ausgesendet. Im Verlauf dieser Zeit unterlag die Hubble-Konstante Veränderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Hier kommt deutlich zum Ausdruck, dass der bei diesen Objekten registrierten Rotverschiebung die kosmische Expansion zugrunde liegt. Es kann also nur eine Betrachtung im Rahmen einer gängigen kosmologischen Theorie zu korrekten Ergebnissen führen.
- e) Galaxien sind (wenn man nicht zu große Winkelbereiche voraussetzt) nicht völlig gleichförmig über die Sphäre verteilt. Sie bilden häufig Bereiche, in denen sie konzentrierter vorzufinden sind. Diese gravitativ gebundenen Anhäufungen werden als *Galaxienhaufen* bezeichnet und können einige Dutzend, aber auch bis zu über 10 000 Mitglieder zählen. Galaxienhaufen zeigen ihrerseits die Tendenz zu noch größeren Gruppierungen, die dann als *Superhaufen* bezeichnet werden.

Die folgende Darstellung kann für einen kurz gefassten Überblick über die Methoden der Entfernungsmessung verwendet werden. Sie enthält jedoch nur einige besonders wichtige Verfahren. Die ungefähr eingetragenen Reichweiten werden sich mit zunehmend besseren Beobachtungstechniken zu größeren Werten hin verschieben.



Ausblick auf Quasare

Nachdem 1954 der Nachweis erbracht wurde, dass die bereits 1946 entdeckte starke Radioquelle Cygnus A einer Galaxie zuzuordnen ist, wurde systematisch nach weiteren Quellen dieser Art gesucht. Anfang der 1960er Jahre gelang es, Radioquellen mit Objekten zu identifizieren, die auf Photoplatten wie Sterne aussahen. Dass es sich nicht um Fixsterne handeln konnte, zeigten schon die Spektren, die sich erheblich von den Sternspektren unterschieden. Nicht minder ungewöhnlich war die breite spektrale Energieverteilung. Für die neu entdeckten, rätselhaften Objekte wurde die Bezeichnung *Quasar* (quasi-stellar radio source) geprägt.

Mittlerweile sind mehr als 2 000 Quasare identifiziert. Ihre Rotverschiebungen reichen von $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 0,1$ bis hin zu $z \approx 6$. Das bedeutet, dass Quasare Fluchtgeschwindigkeiten von über $0,9 \cdot c$ haben können. Sie gehören zu den am weitesten entfernten Objekten, die je beobachtet wurden. Die Tatsache, dass man Quasare über solche Entfernungen hinweg mit optischen Teleskopen sehen und ihre Radiostrahlung registrieren kann, lässt auf ungeheuer große Leuchtkräfte schließen. Ein typischer Wert ist 10^{40} W (die Gesamtleuchtkraft einer Galaxie wie der Milchstraße liegt bei 10^{37} W). Quasare sind also auch die leuchtkräftigsten Objekte im Universum. Die typische absolute Helligkeit eines Quasars beträgt $M = -25$. Wir würden einen derartigen Quasar in 14 Lj Entfernung genauso hell wahrnehmen wie unsere Sonne.

Obwohl die Modellrechnungen zu Quasaren eine ganze Reihe ihrer Eigenschaften noch nicht erklären können, bestehen heute kaum Zweifel daran, dass es sich bei Quasaren um aktive Galaxienkerne handelt. Man geht davon aus, dass sich im Zentrum eines Quasars ein extrem massereiches Schwarzes Loch befindet, das aus seinem Umfeld ständig Materie aufnimmt. Die dabei frei werdende potenzielle Energie wird dann zum Teil in Form von Strahlung abgegeben. Wenn das Schwarze Loch nur zehn Sonnenmassen pro Jahr „verschlingt“, wäre die Energieabgabe eines Quasars sichergestellt.

Die Tatsache, dass Quasare in der näheren Umgebung der Milchstraße nicht, in großen Distanzen aber sehr wohl beobachtet werden, lässt einen weiteren Schluss zu: Wir sehen diese Objekte in einer verhältnismäßig frühen Phase des Universums, in der die Dichte an Quasaren offensichtlich größer war als heute. Es könnte also durchaus sein, dass die leuchtkräftigen Galaxien im Verlauf ihrer Entstehung ein Quasarstadium durchlaufen haben.

Ergänzungen

- a) Auf aktive Galaxienkerne wird man im Unterricht nicht genauer eingehen.
- b) Je nach Stärke der emittierten Radiostrahlung wird zwischen radiolauten und radioleisen Quasaren unterschieden. Nur etwa 10 % der Quasare mit hoher optischer Leuchtkraft sind radiolaut.

Quellen und weiterführende Literatur:

Feitzinger, Galaxien und Kosmologie, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2007

Keller, Astrowissen (Zahlen, Daten und Fakten), Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003

Krautter u. a., Meyers Handbuch Weltall, Meyers Lexikonverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich 1994

Nussbaumer, „Achtzig Jahre expandierendes Universum“, Sterne und Weltraum, Juni 2007

Weigert, Wendker, Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs, Wiley-VCH, Weinheim 2004

Kosmologie

Die Frage nach der Entstehung und dem Werdegang des Weltalls beinhaltet ohne Zweifel eine Vielzahl an weltanschaulichen, philosophischen und religiösen Aspekten. Im Astrophysikunterricht wird man schon aus Zeitgründen nur auf die kosmologischen Aspekte eingehen können.

Ziel der Kosmologie ist es, auf der Basis der Naturgesetze die Struktur und die zeitliche Entwicklung des Universums in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Gerade die allgemeine Relativitätstheorie und die fundamentalen astrophysikalischen Entdeckungen der etwa letzten 100 Jahre sowie die Ergebnisse der modernen Elementarteilchenphysik haben für einen enormen Aufschwung in der Kosmologie gesorgt und ihr zum Status einer exakten Naturwissenschaft verholfen.

Zu dieser Thematik haben die Schülerinnen und Schüler bereits in der 10. Jahrgangsstufe einfache Grundlagen kennen gelernt, die man an geeigneter Stelle aufgreifen und wiederholen wird.

Das kosmologische Prinzip

Die kosmologischen Modelle bauen auf einer notwendigen, aber nicht zu beweisenden Annahme auf. Man geht davon aus, dass das Universum

- *isotrop* ist (das heißt, es gibt weder eine bevorzugte Beobachtungsrichtung noch eine bevorzugte Bewegungsrichtung) und
- *homogen* ist (das heißt, jede Art von Materie, die Strahlungsdichte und jede weitere Form von Energie sind gleichmäßig im Raum verteilt).

Somit kann es im Weltall keinen Ort geben, der in irgendeiner Form vor anderen ausgezeichnet wäre. Das impliziert auch, dass die Naturgesetze im gesamten Universum in der gleichen Weise gültig sind. Selbstverständlich ist zu klären, inwieweit das kosmologische Prinzip mit den Beobachtungstatsachen verträglich ist.

Die fundamentalen Beobachtungen

Wie in jeder naturwissenschaftlichen Disziplin ist auch in der Kosmologie das Zusammenwirken von Theorie und Beobachtung unerlässlich. Von den empirischen Befunden sind vor allem die folgenden vier von elementarer Bedeutung:

- die Galaxienflucht und die Hubble-Beziehung,
- die räumliche Verteilung der Galaxien,
- die kosmische Hintergrundstrahlung,
- der relative Anteil der Elemente in kosmischen Objekten.

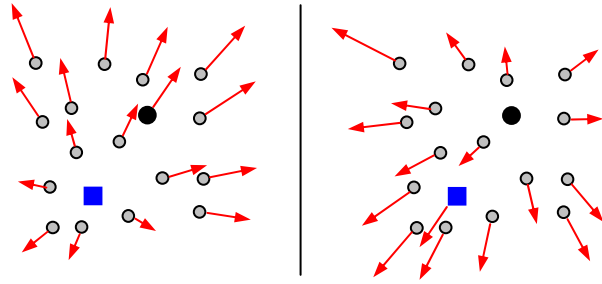
Galaxienflucht und Hubble-Beziehung

Seit den Untersuchungen von Slipher ist bekannt, dass sich weit entfernte Galaxien von uns weg bewegen. Ihre Fluchtbewegung erfolgt umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind, wobei Fluchtgeschwindigkeit und Entfernung direkt proportional zueinander sind.

Der Sachverhalt darf jedoch nicht zu der Fehlvorstellung führen, dass die Milchstraße (■) Zentrum dieser Bewegung ist. Vielmehr registriert ein Beobachter in einer anderen Galaxie (●) die Galaxienflucht und die Hubble-Beziehung ebenso wie wir.

Anders ausgedrückt: Das Universum hat keinen Mittelpunkt. Letztlich kommt ja auch

im Hubble-Gesetz zum Ausdruck, dass die Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien nur von deren Entfernungen und nicht von einer Beobachtungsrichtung abhängen. Andernfalls würde ein Widerspruch zum kosmologischen Prinzip vorliegen.



Die beobachtete Bewegung der Galaxien ist eine Folge der Expansion des gesamten Universums. Zur Veranschaulichung dieser Expansion kann ein mäßig aufgeblasener Luftballon mit aufgemalten Punkten (den Galaxien) dienen. Bläst man ihn weiter auf, lässt sich die Vergrößerung der gegenseitigen Distanzen gut beobachten. Dieses Modell hat einen geringfügigen Schönheitsfehler: Die „Galaxien“ werden beim Aufblasen des Luftballons ebenfalls größer, was natürlich nicht mit der Realität übereinstimmt.

Ergänzung

Die Expansion des Universums darf nicht so verstanden werden, dass sich lediglich die einzelnen Objekte voneinander weg bewegen. Vielmehr ist es der gesamte Raum, der expandiert. In diesem Sinn ist auch die damit verbundene Rotverschiebung nicht als Dopplerverschiebung im eigentlichen Sinn, sondern als Eigenschaft des expandierenden Raums aufzufassen.

Die räumliche Galaxienverteilung

Umfangreiche Galaxiendurchmusterungen haben gezeigt, dass die räumliche Verteilung der Galaxien für „kleine“ Distanzen bis zu einigen 10 Mpc alles andere als gleichmäßig ist. Die Galaxienhaufen und Superhaufen sind in Strukturen mit großen „leeren“ Zwischenbereichen angeordnet, die einem Schaum mit großen Schaumblasen ähnlich sind. Geht man jedoch zu Entfernungen deutlich größer als 100 Mpc und zu großen Winkelbereichen über, erscheint die Materieverteilung sehr gleichmäßig.



Ein Modell für die „Schaumstruktur“ von Galaxienhaufen lässt sich einfach herstellen. In einem Becherglas vermischt man einige Tropfen Spülmittel mit ganz wenig Wasser. Bläst man mit einem Trinkhalm in die Lösung, ergeben sich die gewünschten Schaumblasen.

Mit dem Ziel, durch eine Computersimulation zur Klärung der Frage nach der Entstehung von Sternen und Galaxien nach dem Urknall beizutragen, haben sich Kosmologen verschiedener Länder unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik zu einem Projekt zusammengefunden. Im Juni 2005 wurden die Ergebnisse des aufwändigen Projekts in der Zeitschrift „Nature“ veröffentlicht. Die faszinierenden Visualisierungen der Simulation und den Text der Pressemitteilung findet man (mit der Möglichkeit zum Download) auf der Seite www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse (Stand Juli 2008).

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Die beiden Physiker Arno Penzias und Robert Wilson haben 1965 durch Zufall eine für die Kosmologie ganz entscheidende Beobachtung gemacht. Mit ihrer für die Untersuchung von Satellitensignalen konstruierten Hornantenne entdeckten sie eine Radiostrahlung, welche der Strahlung aller bekannten Radioquellen überlagert ist und hervorragend der Strahlung eines Schwarzen Körpers von etwa 3 K entspricht. Sie fällt aus allen Richtungen des Universums gleichmäßig auf die Erde ein und erfüllt somit das kosmologische Prinzip. Die Existenz dieser kosmischen *Hintergrundstrahlung* (häufig auch 3-K-Strahlung) hatte bereits George Gamow in den 1940er Jahren vorhergesagt.

Die Struktur der Galaxienverteilung lässt sich nur dann schlüssig erklären, wenn man bereits beim noch jungen Universum von Inhomogenitäten in der Verteilung der baryonischen und vor allem der dunklen Materie ausgeht, die dann im weiteren Entwicklungsverlauf die Ausbildung von Bereichen mit höherer bzw. weniger hoher Materiekonzentration zur Folge hatten. Wenn solche Dichteschwankungen existiert haben, müssen sie sich auch in minimalen Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung zeigen. Tatsächlich konnten derartige Temperaturschwankungen Anfang der 1990er Jahre mit Hilfe des Satelliten COBE und etwa 10 Jahre später mit WMAP mit ungeheurer Präzision bestätigt werden. Seitdem gilt die 3-K-Strahlung als stärkstes Argument für die Urknallhypothese.

Elementhäufigkeit in kosmischen Objekten

Der relative Anteil der Elemente in Materie, die noch nicht Bestandteil von Sternen war, spiegelt die chemische Zusammensetzung des frühen Universums wieder. Messungen zeigen, dass sich in fast allen Objekten dieser Art ausschließlich gut 70 % Wasserstoff, knapp 30 % Helium, sowie Spuren von Lithium finden.

Ergänzungen

- a) Auch die Tatsache, dass in der Nacht der Himmel dunkel ist, zählt zu den fundamentalen Beobachtungen. Hierzu hat der Bremer Arzt Wilhelm Heinrich Olbers bereits 1823 das nach ihm benannte *Olberssche Paradoxon* formuliert: Wenn man von einem unendlich ausgedehnten, gleichmäßig mit Sternen erfüllten und unbegrenzt lang existierenden Weltall ausgeht und eine mittleren Sterndichte wie in der Umgebung der Sonne sowie Sterne von der Größe der Sonne voraussetzt, ergäbe sich bereits ab einer freien Sichtweite in der Größenordnung von ca. 10^{17} Lj eine vollständige Abdeckung der Sphäre mit Sternen. Demnach müsste der ganze Himmel ungefähr so hell wie die Sonnenscheibe strahlen, was (zum Glück) nicht mit der tatsächlichen Beobachtung übereinstimmt. Eine Auflösung ergibt sich dadurch, dass das Universum nicht statisch ist und ein endliches Alter aufweist. Auch wenn das Olberssche Paradoxon nicht als Unterrichtsinhalt vorgesehen ist, kann es doch als motivierender Einstieg in die Thematik dienen.
- b) Für Galaxiendurchmusterungen kommen sogenannte Multiplex-Spektrographen zum Einsatz. Sie gestatten es, mit einer einzigen Aufnahme Hunderte von Galaxienspektren gleichzeitig zu erfassen. Damit ist es möglich, in einem Jahr die Rotverschiebungen von etwa 10^5 Galaxien zu erfassen.
- c) Das vom FIRAS-Instrument des Satelliten COBE ausgemessene Spektrum des Mikrowellenhintergrunds entspricht von allen (auch in irdischen Laboren) je erfassten Spektren am besten der Planckschen Verteilung.
- d) Die Instrumente der Raumsonde WMAP sind derart empfindlich, dass sie Temperaturunterschiede bis zu einer Größenordnung von 10^{-5} K auflösen können. Für die zur Hintergrundstrahlung gehörende mittlere Temperatur wurde ein Wert von $(2,728 \pm 0,004)$ K ermittelt.

Der Urknall

Die Galaxienbewegung ist ein Beleg für eine zeitliche Entwicklung des Universums von einem früheren zum jetzigen Stadium. Wenn man diese Entwicklung gedanklich zurückverfolgt, stellt sich unweigerlich die Frage nach ihrem Beginn.

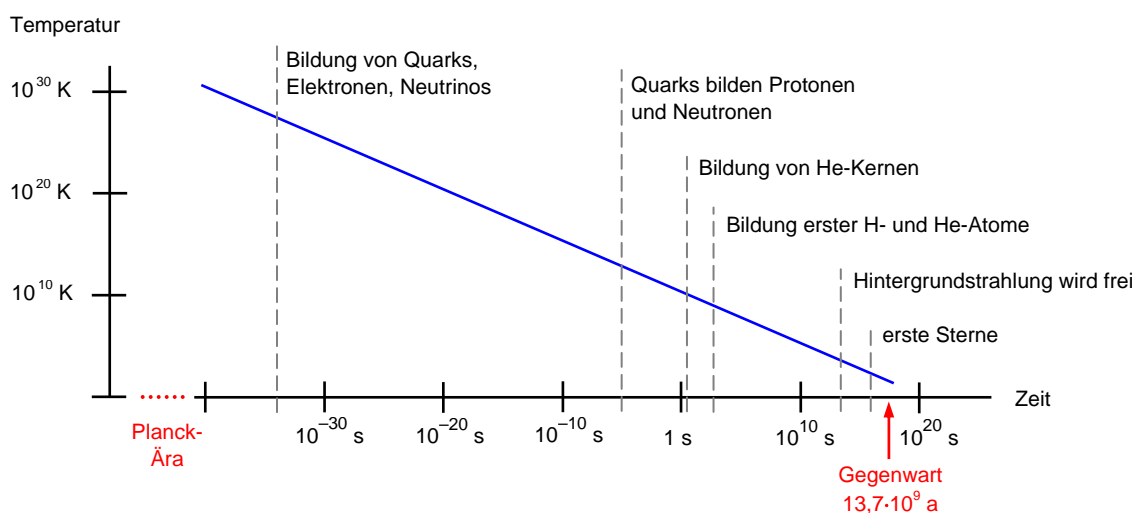
Die Theorie geht davon aus, dass sich der Kosmos vor 13,7 Milliarden Jahren spontan aus einem Zustand mit winzigem Volumen sowie extrem hoher Temperatur und extrem hoher Dichte entwickelt hat. Dieser Anfang wird häufig als *Urknall* bezeichnet.

Gleich von Anfang an sollte man die Vorstellung der Schülerinnen und Schüler in die gewünschte Richtung lenken. Der Urknall fand nicht an einem einzigen Punkt, sondern „überall“ statt. Die Frage, was vor dem Urknall geschah, entzieht sich nicht nur unserer Anschauung sondern ist gegenstandslos, da weder Raum noch Zeit noch Naturgesetze existierten.

Durch die mit dem Urknall einsetzende Expansion wird das neu entstandene Universum kühler und seine Dichte nimmt ab. Das hat eine Reihe von Entwicklungsschritten zur Konsequenz, deren zeitlicher Ablauf im Folgenden vereinfacht dargestellt ist.

Die ersten 3 Minuten	Infolge der Abkühlung gehen aus einer Reihe komplexer Vorgänge Elektronen, Protonen, Neutronen, Neutrinos und Photonen hervor.
Ab etwa 3 min bis 10^5 a	In dieser Phase entstehen zunächst die ersten He-Kerne (und vereinzelt Li-Kerne). Infolge der weiteren Abkühlung können sich aus den H- und He-Kernen (und den wenigen Li-Kernen) zusammen mit den Elektronen Atome bilden, mit einem Anteil von ca. 77 % Wasserstoff und ca. 23 % Helium (in Übereinstimmung mit den Beobachtungsergebnissen). So entsteht das „Baumaterial“ für das gesamte materielle Universum.
Etwa 10^5 a bis 10^9 a	Ab einem Weltalter von etwa 380 000 Jahren sind die Photonen nicht mehr ständig in Ionisierungs- und Streuprozesse eingebunden, es kommt zu ihrer „Abkopplung“ von der Materie. Dadurch wird das Universum neutral und durchsichtig. Die Hintergrundstrahlung ist das beobachtbare „Überbleibsel“ dieses Prozesses.
Ab etwa 10^9 a	Die ersten Sterne und Galaxienbausteine entstehen. Nach etwa 8 Milliarden Jahren formieren sich erste Galaxienhaufen und eine großräumige Strukturbildung setzt ein. Nach etwa 9 Milliarden Jahren entsteht unser Sonnensystem.

Die Temperatur ist der für den gesamten Entwicklungsprozess des Universums entscheidende Parameter. In der folgenden Graphik ist die Entstehung verschiedener Teilchen in Abhängigkeit von der Temperatur schematisch dargestellt.



Ergänzungen

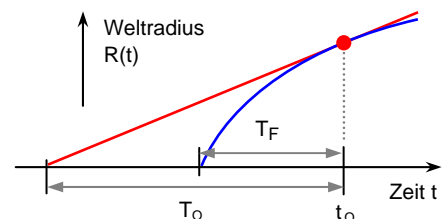
- Der Begriff „Big Bang“ wurde von dem Astrophysiker F. Hoyle geprägt. Er war ein erklärter Gegner der Vorstellung eines zeitlich konkreten Anfangs des Universums und hat die Bezeichnung mit der Absicht verwendet, diese Idee lächerlich zu machen. Freilich konnte er nicht ahnen, dass die Anhänger der Idee den Begriff aufgreifen würden und dieser heute zum Fachvokabular zählt.
- Für die ersten 10^{-43} s (die *Planck-Ära*) des Universums ist eine physikalisch sinnvolle Aussage über einzelne Vorgänge nicht möglich. Hierzu wäre eine Quantengravitationstheorie erforderlich, die es noch nicht gibt. Diese Phase wird häufig mit „dem Urknall“ identifiziert.
- Für den Zeitraum von etwa 10^{-43} s bis 10^{-12} s gibt es eine Reihe von Hypothesen, die sich jedoch experimentell nicht überprüfen lassen, da die hierfür erforderlichen Energien auch in den größten Teilchenbeschleunigern bisher nicht erreicht werden können.
- Als besonders bedeutend wird die Hypothese der *kosmischen Inflation* eingestuft. Während des kurzen Zeitabschnitts von 10^{-35} s bis 10^{-32} s kam es vermutlich zu einem extremen Anwachsen des Universums um rund 54 Zehnerpotenzen. Im Anschluss an diese Inflation verlief die Expansion wieder „normal“. Bislang fehlen für die kosmische Inflation empirische Hinweise. Sie liefert aber sehr plausible Erklärungen u. a. dafür, dass wir ein flaches Universum beobachten, d. h. auf großen Skalen keine Raumkrümmung feststellen, und für den Ursprung kosmischer Strukturen.
- In der Phase von etwa 10^{-12} s bis 1 s haben die Energien der Materiebausteine bereits so weit abgenommen, dass die theoretischen Überlegungen in den Teilchenbeschleunigern überprüft werden können. Aufgrund der Untersuchungen ist man sich sicher, dass alle Elementarteilchen und die Austauschteilchen der vier Grundkräfte vorhanden sind. Es findet die Zerstrahlung fast aller Quarks und Antiquarks statt. Aufgrund einer winzigen Asymmetrie (auf etwa 1 Milliarde Quark-Antiquark-Paare kommt ein Quark ohne Antiquark) verbleibt ein geringfügiger Überschuss an Quarks, aus denen sich später die gesamte „normale“ Materie bildet. Ab etwa 10^{-6} s entstehen Protonen.
- In der Zeit von etwa 1 s bis 3 min zerstrahlen fast alle Elektron-Positron-Paare. Es bleiben gerade so viele Elektronen übrig, dass ihre Anzahl jener der Protonen entspricht. Die Dichte ist so weit gesunken, dass die Neutrinos so gut wie nicht mehr mit Materie wechselwirken (Entkopplung der Neutrinos). Außerdem entstehen Neutronen.

Zur Abschätzung des Weltalters

Für den einfachsten Fall einer völlig gleichförmigen Expansion ergibt sich das Alter des Universums zu $T_0 = \frac{r}{v} = \frac{r}{H_0 \cdot r} = \frac{1}{H_0}$, ist also gleich dem Kehrwert der Hubble-Konstante. Mit

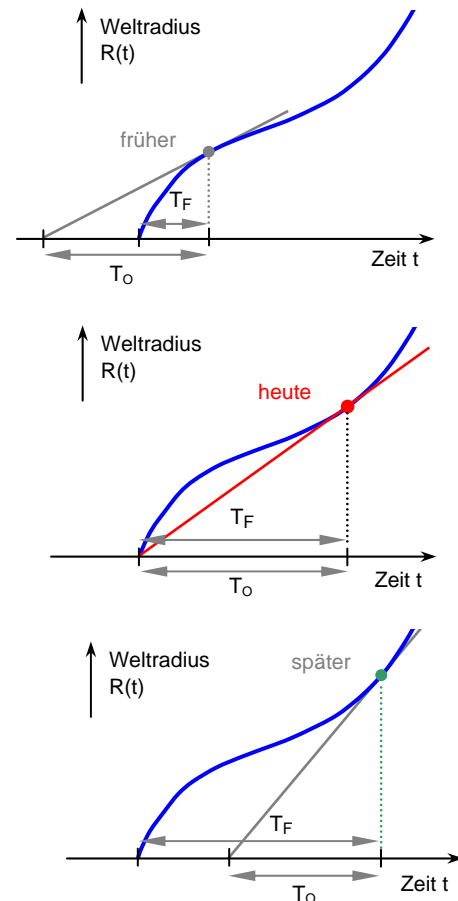
$H_0 \approx 70 \frac{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Mpc}}$ folgt $T_0 \approx 1,4 \cdot 10^{10}$ a. Das so berechnete Alter heißt Hubble-Zeit.

Die Beobachtung weit entfernter Supernovae vom Typ Ia hat Belege dafür geliefert, dass die Expansionsgeschwindigkeit des Universums früher höher war als heute. Für die Abschätzung legt man in diesem Fall zum Zeitpunkt t_0 (heute) die Tangente an die $R(t)$ -Kurve. Der Kehrwert der Hubble-Konstante ergibt eine Zeitspanne T_0 , die größer als das tatsächliche Weltalter (die sogenannte Friedmann-Zeit T_F) sein muss. T_0 stellt eine obere Grenze für das Weltalter dar.



Die Beobachtung ferner Supernovae hat weiter gezeigt, dass die Expansion des Universums seit einiger Zeit beschleunigt verläuft. Je nach Beobachtungszeitpunkt liefert der Kehrwert der Hubble-Konstante eine Hubble-Zeit T_0 , die von der Friedmann-Zeit T_F zum Teil erheblich abweicht. Während in der abgebremsten Phase stets $T_0 > T_F$ gilt, folgt für die beschleunigte Phase $T_0 < T_F$. Also muss es „zwischenhin“ einen Zeitpunkt geben, für den die Hubble-Zeit mit dem tatsächlichen Weltalter übereinstimmt. Das ist offensichtlich gegenwärtig (wohl zufällig) der Fall.

Momentan geht man davon aus, dass das Universum 13,7 Milliarden Jahre alt ist. Dieses kosmologisch ermittelte Weltalter korreliert recht gut mit Beobachtungsergebnissen, die auf ganz anderen Wegen ermittelt wurden, wie zum Beispiel der statistischen Verteilung von Sternhaufen im Hertzsprung-Russell-Diagramm, der Altersbestimmung von Kugelsternhaufen oder der relativen Häufigkeit verschiedener radioaktiver Elemente.



Die Entwicklung des Universums im Zeitraffer

In diesem Modell ist die Zeitspanne vom Urknall bis zur Gegenwart auf ein Jahr komprimiert. Der Schwerpunkt dieser Darstellung liegt auf der Entwicklung von Leben auf der Erde.

1. Januar	Um 0 Uhr findet der Urknall statt.
Mitte Januar	Materie beginnt sich zu ersten Sternen und Galaxien zu verdichten.
Mitte August	Unser Sonnensystem entsteht (Dauer etwa 1 Tag).
Anfang Oktober	In Form von Algen treten erste Lebensspuren auf.
19. Dezember	Die Entwicklung von Pflanzen und Fischen setzt ein.
25. Dezember	Abends: Die ersten Säugetiere treten auf.
30. Dezember	Die Alpen falten sich hoch.
31. Dezember	Ab 22.45 Uhr kann man von der frühen Existenz von Menschen ausgehen. 20 Sekunden vor Mitternacht beginnt die eigentliche Menschheitsgeschichte.

Ergänzung

Für die künftige Entwicklung des Universums lassen sich grobe Prognosen stellen. In den nächsten 10^{10} Jahren werden fast alle der bisherigen Sterne erloschen und eine neue Sternengeneration entstanden sein. Die Entfernungen der Galaxien nehmen aufgrund der (leicht beschleunigten) Expansion riesige Werte an. Bis in 10^{12} Jahren werden die interstellaren Gas- und Staubbmassen als Baumaterial für Sterne aufgebraucht sein, die dann noch existierenden Sterne werden mehr und mehr verlöschen. In 10^{20} Jahren wird das dann praktisch total dunkle Universum nur noch ausgebrannte Zwergsterne, Neutronensterne und teilweise extrem massereiche Schwarze Löcher enthalten. Alle weiteren, über diesen Zeitraum hinausgehenden Überlegungen (sie reichen bis zum vollständigen Zerfall der baryonischen Materie) können momentan nur spekulativen Charakter haben.

Weltmodelle

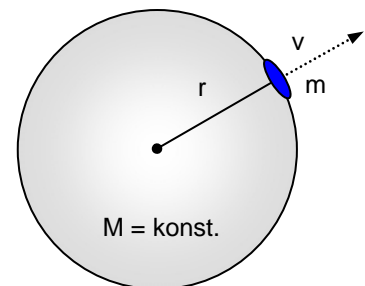
Eine Theorie über seine Entwicklung muss von der grundlegenden Kraft im Universum – der Gravitationskraft – ausgehen und ihren Einfluss auf Raum und Zeit berücksichtigen. Die einzige Theorie, die als Basis hierfür dienen kann, ist die allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Auch wenn die allgemeine Relativitätstheorie nicht Gegenstand des Unterrichts sein kann, lassen sich doch grundlegende Aspekte der daraus resultierenden Weltmodelle aufzeigen. Ein statisches Universum ist dabei auszuschließen, da nicht nur die Beobachtungsbefunde, sondern auch aktuelle theoretische Überlegungen eindeutig auf ein expandierendes Universum führen.

Eine Betrachtung im Rahmen der Newtonschen Mechanik

Aus der im kosmologischen Prinzip geforderten Homogenität des Universums folgt, dass jeder beliebige herausgegriffene Teilbereich charakteristisch für das gesamte Universum sein muss. Da die allgemeine Relativitätstheorie die Newtonsche Mechanik als Grenzfall für schwache Gravitationsfelder und geringe Distanzen enthält, machen sich relativistische Effekte erst bei entsprechend großen Entfernungen bemerkbar. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass sich einzelne Aspekte über die Struktur und das zeitliche Verhalten des Kosmos auch mit Hilfe der Newtonschen Mechanik ergeben.

Um eine Aussage über das dynamische Verhalten des Weltalls zu gewinnen, geht man von einer hinreichend großen, gleichmäßig mit Materie erfüllten Kugel mit Radius r und einem Objekt der Masse m am Rand dieser Kugel aus, die beide der Expansion des Raumes unterliegen. Außerdem ist zu berücksichtigen:

- Es findet kein Materietransport durch die Kugeloberfläche statt. Die Materiedichte ρ des betrachteten Kugelvolumens ist somit zwar von der Zeit, aber nicht vom Ort abhängig.
- Um die Bedingung der Isotropie zu erfüllen, ist nur eine radiale Expansion (oder Kontraktion) gemäß der Hubble-Beziehung $v = H \cdot r$ möglich.
- Massen, die außerhalb der betrachteten Kugel liegen, haben aufgrund ihrer homogenen Verteilung in ihrer Gesamtheit keinen gravitativen Einfluss auf das Objekt. Deshalb wirkt auf das Objekt nur die Gravitationskraft, die von der Masse M innerhalb der Kugel herrührt.
- Im Zusammenhang mit der Newtonschen Mechanik wird grundsätzlich ein euklidischer Raum vorausgesetzt.



Die mechanische Gesamtenergie des Objekts setzt sich aus seiner kinetischen Energie und seiner potenziellen Energie im Gravitationsfeld der Masse M zusammen:

$$E = \frac{m}{2} \cdot v^2 - G \cdot \frac{M \cdot m}{r}.$$

Für einen Vergleich mit den empirischen Befunden ist es sinnvoll, die Materiedichte und die Hubble-Konstante einzuarbeiten. Mit $M = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3$ und $v = H \cdot r$ folgt

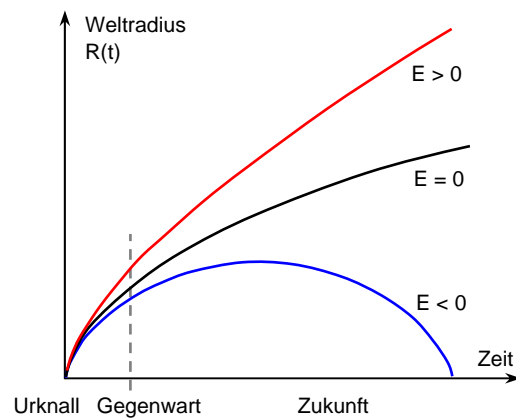
$$E = \frac{m}{2} \cdot H^2 \cdot r^2 - G \cdot \frac{m}{r} \cdot \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{m}{2} \cdot r^2 \cdot \left(H^2 - \frac{8\pi}{3} \cdot G \cdot \rho \right) \quad (*).$$

Das Vorzeichen der Gesamtenergie ist nur von der Klammer abhängig, es lassen sich drei Fälle unterscheiden:

- a) $E < 0$:
Die kinetische Energie des Objekts ist nicht groß genug, um dem Gravitationsfeld von M zu entkommen. Die Expansionsbewegung erreicht einen Zustand maximaler gegenseitiger Entfernung der Objekte und kehrt sich dann um (entsprechend einem nach oben geworfenen Körper, der wieder auf die Erde zurückfällt). Die Entwicklung endet mit einem Kollaps („heißer Endzustand“).
- b) $E > 0$:
Die Expansion wird durch die Gravitation zwar verlangsamt, kann aber nie zum Stillstand kommen. Das Universum expandiert für alle Zeiten unbeschränkt (entsprechend einem Körper, der die Erde mit einer Geschwindigkeit verlässt, die größer als die Fluchtgeschwindigkeit ist). Die Entwicklung endet allmählich mit einem Erlöschen der Sterne und dem Auskühlen der Materie („kalter Endzustand“).
- c) $E = 0$:
Hier handelt es sich um den Grenzfall zwischen $E < 0$ und $E > 0$. Die Expansion verlangsamt sich ständig und kommt für $t \rightarrow \infty$ im Unendlichen zum Stillstand (entsprechend einem Körper, der die Erde exakt mit der Fluchtgeschwindigkeit verlässt). Auch hier endet die Entwicklung in einem „kalten Endzustand“.

Die drei Fälle sind in der nebenstehenden Graphik qualitativ dargestellt. Für kleine Zeitwerte zeigen alle drei Kurven einen ähnlichen Verlauf.

Welche Entwicklung das Universum tatsächlich durchläuft, hängt nach diesem Modell ausschließlich vom Wert der Klammer in Gleichung (*) ab. Die Klammer enthält als einzige Variable die Hubble-Konstante und die mittlere Dichte des Universums, die sich beide zeitlich ändern können.



Für den Grenzfall $E = 0$ folgt aus (*) die sogenannte *kritische Dichte* $\rho_{\text{kritisch}} = \frac{3 H_0^2}{8\pi \cdot G}$.

Eine sichere Entscheidung, welcher der drei Fälle für das Universum zutrifft, ist derzeit nicht möglich, da die Hubble-Konstante und erst recht die mittlere Dichte des Universums gegenwärtig mit großer Unsicherheit versehen sind.

Ergänzung

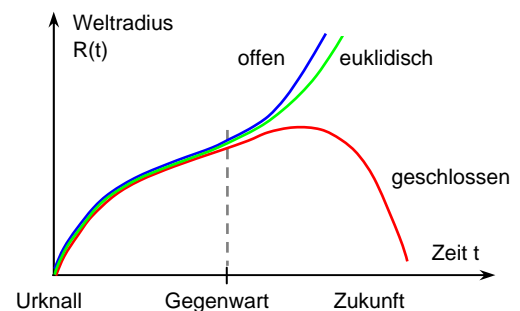
Für das auf der Newtonschen Mechanik basierende Modell wird grundsätzlich ein euklidischer, unendlich ausgedehnter Raum vorausgesetzt. In diesen Raum hinein breitet sich das Universum aus.

Das Standardmodell der Kosmologie

Mit der Forderung nach einem isotropen und homogenen Universum lassen sich die komplizierten Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie auf zwei Gleichungen reduzieren, da jegliche Ortsabhängigkeit wegfällt. Für die zwei nur noch von der Zeit abhängigen Gleichungen gibt es geschlossene Lösungen. Dies wurde 1922 von Alexander Friedmann gezeigt, weshalb diese Gleichungen auch als *Friedmann-Gleichungen* bezeichnet werden. Eine der wichtigsten Konsequenzen aus den Friedmannschen Gleichungen ist ein dynamisches Universum.

Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt alle Vorgänge in einer vierdimensionalen Raum-Zeit. Abhängig vom Massen- und Energieinhalt des Universums führen die Friedmann-Gleichungen auf drei Möglichkeiten für die vierdimensionale Raumstruktur:

- Bei großem Massen- und Energieinhalt ergibt sich ein räumlich positiv gekrümmtes (offenes) Universum mit sphärischer Geometrie.
- Bei geringem Massen- und Energieinhalt ergibt sich ein räumlich negativ gekrümmtes (geschlossenes) Universum mit hyperbolischer Geometrie.
- Die dritte Möglichkeit ist ein räumlich flaches Universum mit euklidischer Geometrie.

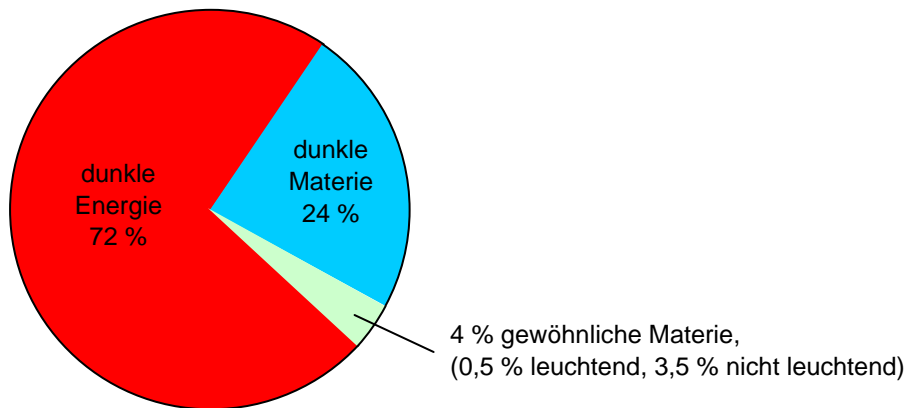


Zur Veranschaulichung kann wieder das Modell des sich aufblähenden Luftballons herangezogen werden. Die zweidimensionalen Bewohner der zweidimensionalen, gekrümmten Ballonoberfläche sind mit ihrer Ballonwelt in einen dreidimensionalen Raum eingebunden, den sie nicht wahrnehmen können. Je stärker sich der Luftballon aufbläht, umso mehr wird ein Ballonbewohner seine „Welt“ zumindest lokal als flach wahrnehmen. Die Luftballonwelt ist übrigens eine zwar endliche, aber trotzdem unbegrenzte Welt.

Aus dem Bewegungsverhalten von Galaxien im Coma-Galaxienhaufen folgte der Astronom Fritz Zwicky bereits in den 1930er Jahren, dass die Gravitationswirkung der sichtbaren Materie alleine nicht ausreicht, um die Bewegung der Galaxien korrekt zu beschreiben. Untersuchungen der Rotation von Sternen und Gasmassen um die Zentren von Spiralgalaxien in den 1960er Jahren führten ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die vorhandene Masse deutlich größer als die beobachtete Masse sein muss. Das bedeutet, dass es eine Materiekomponente geben muss, die gravitativ wirkt, aber Strahlung weder emittiert noch absorbiert. Man bezeichnet sie deshalb als *dunkle Materie*.

Entfernungs- und Rotverschiebungsmessungen an Supernovae vom Typ Ia lassen eine Aussage zum Expansionsverhalten des Weltalls zu. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Universum seit etwa 7 Milliarden Jahren beschleunigt expandiert, obwohl die Ausdehnung aufgrund der Massenanziehung eigentlich verlangsamt erfolgen sollte. Für die beschleunigte Expansion machen die Kosmologen die sogenannte *dunkle Energie* verantwortlich.

Die Auswertung der Messungen zur kosmischen Hintergrundstrahlung hat ergeben, dass unser Universum vermutlich räumlich flach ist. Das ist nur möglich, wenn die Dichte aller Materie- und Energieformen zusammen etwa gleich der kritischen Dichte ist. Nimmt man zur sichtbaren Materie die dunkle Materie und die dunkle Energie hinzu, wird diese Forderung erfüllt. Woraus dunkle Materie besteht und was man sich unter dunkler Energie vorzustellen hat, weiß man derzeit nicht. Die jeweiligen Anteile sind in der folgenden Graphik veranschaulicht.



Somit ergibt sich ein Weltmodell (das derzeitige Standardmodell der Kosmologie), das unser Universum im Einklang mit den kosmologischen Messungen sehr gut beschreibt.

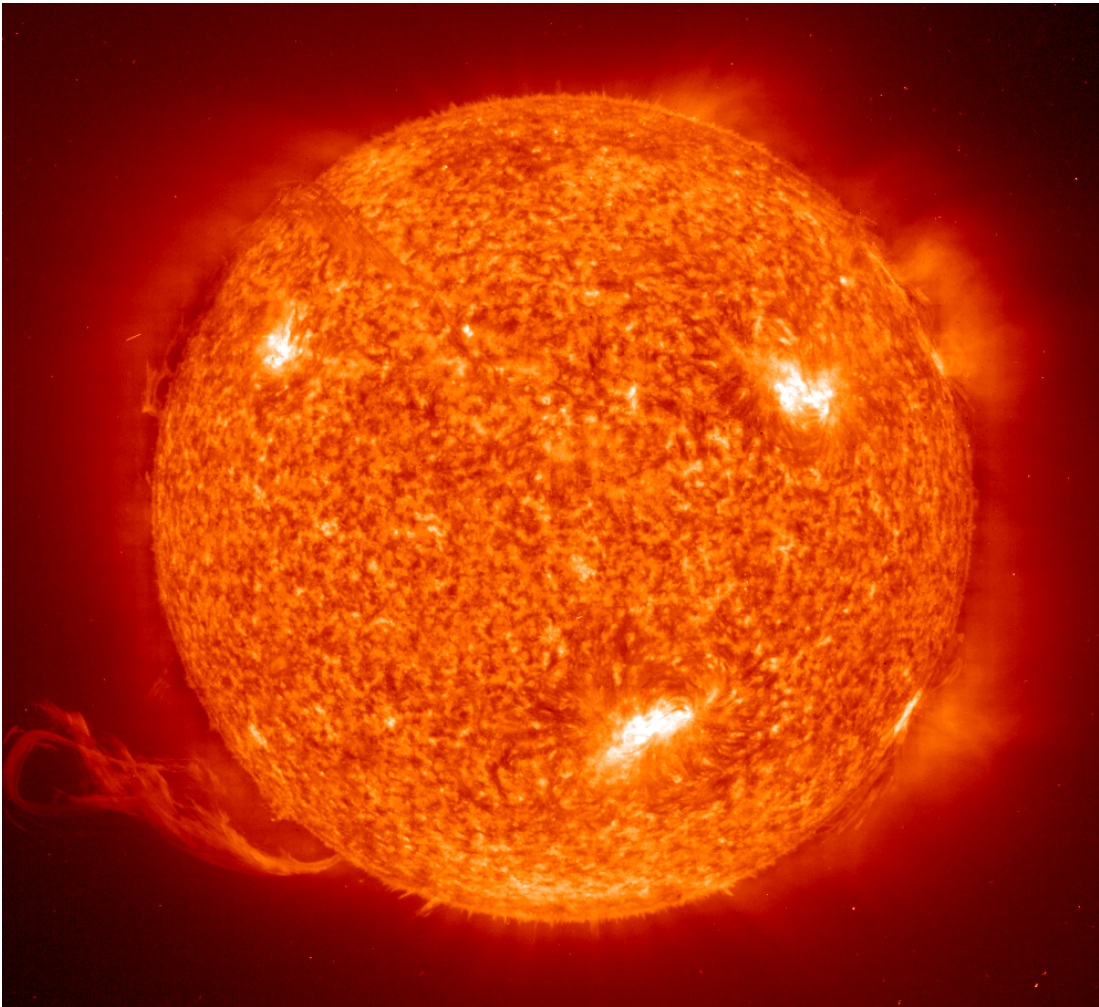
Ergänzungen

- Der Mathematiker Alexander Friedmann (1888 - 1925) war der erste, der aus den Einsteinschen Feldgleichungen theoretisch ein dynamisches Weltall gefolgert hat. Seine Arbeit wurde aber nicht zur Kenntnis genommen. Die erste Publikation, in der ein expandierendes Universum sowohl theoretisch abgeleitet als auch durch Beobachtungsdaten belegt wurde, stammt aus dem Jahr 1927 und geht auf den belgischen Geistlichen und Wissenschaftler Georges Lemaître (1894 - 1966) zurück.
- Um einen gravitativen Kollaps zu verhindern und die Vorstellung des statischen Universums zu retten, führte Albert Einstein (1879 - 1955) ursprünglich die kosmologische Konstante Λ ein. Nach einiger Zeit wurde sie von ihm allerdings wieder verworfen. Viele Jahre später haben die Kosmologen die kosmologische Konstante Λ erneut eingeführt, allerdings mit einer ganz anderen Bedeutung: Sie vertritt in den Friedmann-Gleichungen die dunkle Energie (genauer: die Energiedichte des Vakuums) und ist somit für die beschleunigte Expansion des Universums „verantwortlich“.
- Bei den relativistischen Weltmodellen expandiert die gesamte Raum-Zeit. Die im Universum vorhandenen Materie ist für die Krümmung dieser vierdimensionalen Raum-Zeit verantwortlich.

Quellen und weiterführende Literatur:

Bartelmann, Das Standardmodell der Kosmologie (Teile 1 und 2), Sterne und Weltraum, August 2007 und September 2007
 Feitzinger, Galaxien und Kosmologie, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2007
 Herrmann, Schwarz, „Astronomie Basiswissen Schule“, paetec, Berlin, Bibl. Institut, Mannheim 2001
 Keller, „Astrowissen“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003
 Keller, „Woraus besteht das Universum?“, Kosmos Himmelsjahr 2007, Franckh-Kosmos 2006
 Schneider, „Extragalaktische Astronomie und Kosmologie“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2006
 Nussbaumer, „Achtzig Jahre expandierendes Universum“, Sterne und Weltraum, Juni 2007
 Schneider, „Die Grundfragen der Kosmologie“, Sterne und Weltraum, Juli 2007
 „Hubble-Konstante und Weltalter“, Sterne und Weltraum, August 2007,
 Weigert, Wendker, Wisotzki, „Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs“, Wiley-VCH, Weinheim 2005
 Zimmermann, Weigert, „ABC-Lexikon Astronomie“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford 1995
www.teilchenphysik.de/e25/e739 (Stand Juli 2008), empfehlenswerte Seite des DESY Hamburg

2 Beobachtung und Geräteausstattung



Sonne im äußersten UV-Licht / SOHO-EIT Consortium, ESA, NASA

2.1 Organisation von Beobachtungsabenden

Die eigene Beobachtung astronomischer Objekte führt bei den Schülerinnen und Schülern sicher zu den nachhaltigsten Eindrücken in Verbindung mit dem Astrophysik-Kurs. Im Lehrplan sind deshalb mehrere Beobachtungsabende dafür vorgesehen. Gerade bei „kleiner“ Schulausstattung ist auch der Besuch einer Sternwarte zu empfehlen. In Kapitel 2.6 werden Anregungen für das Auffinden geeigneter Kontaktadressen gegeben.

Im Zusammenhang mit Beobachtungsabenden sind folgende versicherungsrechtliche Aspekte wichtig (→ KMS Nr. VI.9 – O 5210 R 7 – 6.6777 vom 25. Juni 2008):

- Die Schülerinnen und Schüler sind während der Teilnahme an von der Schule durchgeführten nächtlichen Himmelsbeobachtungen gesetzlich unfallversichert. Wesentlich ist dabei, dass es sich um offizielle Schulveranstaltungen handelt, was in jedem Fall vorab eine Rücksprache mit der Schulleitung und deren Genehmigung voraussetzt.
- Im Gegensatz zu Schul-/Studienfahrten und Fachexkursionen, bei denen die Benutzung privater Kraftfahrzeuge grundsätzlich nicht gestattet ist, hängt der Versicherungsschutz an einem Beobachtungsabend nicht von der Wahl des Verkehrsmittels ab. Die Schülerinnen und Schüler sind also auch bei der Benutzung von privaten Pkws und bei der Bildung von Fahrgemeinschaften versichert.
- Der Versicherungsschutz ist nur gegeben, wenn die Schülerinnen und Schüler den Weg zur Beobachtung direkt von zu Hause antreten und unmittelbar nach Beendigung der Beobachtung wieder nach Hause zurückkehren, denn nur dann gilt dieser Weg als Schulweg.

Bei den folgenden Hinweisen ist zu bedenken, dass astronomische Beobachtungen immer an die örtlichen Gegebenheiten und die instrumentelle Ausrüstung gebunden sind. Deshalb kann an dieser Stelle auch nur über allgemeine Erfahrungen berichtet werden.

Die Terminwahl

Der Beobachtungstermin sollte natürlich in erster Linie durch die Beobachtungsobjekte und die Wetterlage bestimmt sein. Aus Gründen der Effizienz ist es ratsam, auch Klausurtermine der Kollegiaten mit zu berücksichtigen. Ist man durch einen Wetterumschwung zu einer Änderung gezwungen, müssen die Schülerinnen und Schüler kurzfristig verständigt werden. Hierzu empfiehlt es sich, nach dem „Schneeballsystem“ eine telefonische Benachrichtigung zu organisieren.

Unbedingt zu beachten ist die jeweilige Mondphase: Falls nicht ausdrücklich eine Mondbeobachtung vorgesehen ist, sollte maximal der halbe Mond sichtbar sein, damit die Helligkeit des Mondlichts die Sternbeobachtung nicht zu sehr stört. Aber auch für eine Mondbeobachtung muss nicht unbedingt Vollmond sein. Gerade im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze der Mondoberfläche zeigen sich Mondkrater besonders kontrastreich.

Durch die Einführung der Sommerzeit sind die Beobachtungsabende in der Regel auf Herbst, Winter und zeitiges Frühjahr beschränkt. Daraus ergibt sich unter Umständen eine zeitliche Verschiebung zwischen der Beobachtbarkeit einzelner Objekten und ihrer Behandlung im Unterricht, mehrere Objekte entziehen sich sogar gänzlich der Beobachtung.

Die Wahl des Ortes

In Großstädten oder an Schulen, die keine eigene Beobachtungsstation haben, ist man gezwungen, einen geeigneten Beobachtungsort zu suchen. Als Auswahlkriterien können folgende Punkte hilfreich sein:

- Die Orientierung soll nach allen Himmelsrichtungen möglich sein.
- Der Himmel soll wenigstens ab etwa 15° über dem Horizont beobachtbar sein. In der Nähe dürfen sich keine intensiven Lichtquellen befinden.
- Der Ort muss auch bei Dunkelheit leicht erreichbar sein.
- Die Anfahrt soll zumutbar sein (möglichst öffentliche Verkehrsmittel).

Der erste Abend

In den Medien werden oft spektakuläre Aufnahmen von astronomischen Objekten gezeigt. Dadurch wird das Interesse vieler Schülerinnen und Schüler geweckt. Im Vergleich zu den mit hohem Aufwand erstellten Bildern ruft der erste Blick durch ein typisches Schulfernrohr dann oft Enttäuschung hervor. Deshalb ist es ein wichtiges Anliegen, im Rahmen des ersten Beobachtungsabends Illusionen abzubauen. Selbst große Instrumente können einen Fixstern nur als punktförmiges Objekt zeigen, und der farbenprächtige Eindruck von vielen Nebeln entsteht eben erst durch lange Belichtungszeiten und aufwändige Techniken.

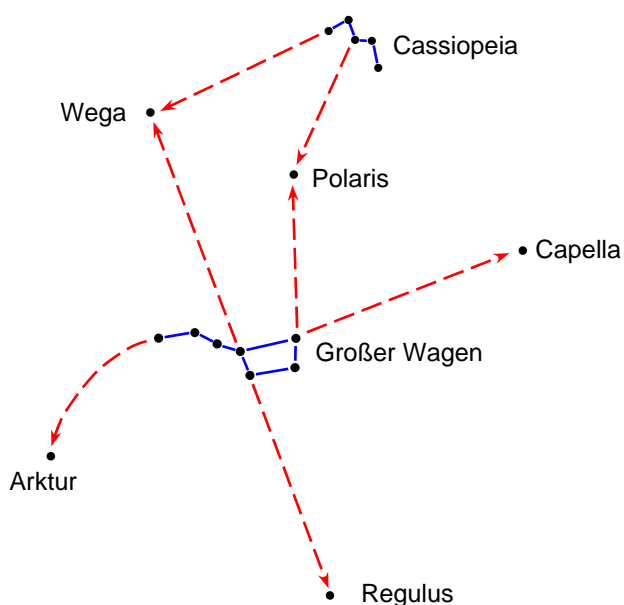
Neben der elementaren Erkenntnis, dass für gelungene astronomische Beobachtungen nicht immer ein großes Fernrohr erforderlich ist, gilt für den ersten Abend vor allem, dass die Schülerinnen und Schüler

- eine erste Orientierung am Sternhimmel gewinnen,
- sich von der scheinbaren Bewegung der Himmelskörper überzeugen
- und eventuell einfache Abschätzungen und Vergleiche durchführen.

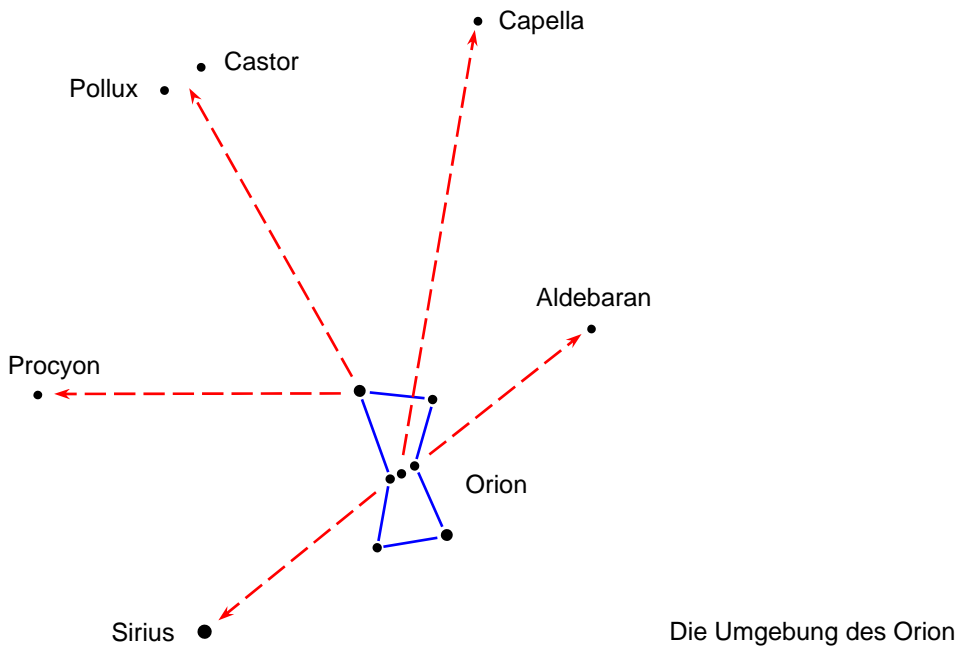
Orientierung am Nachthimmel

Jeder weiß, wie schwierig ein Stern zu finden ist, wenn er nur durch den ausgestreckten Arm gezeigt wird. Neben dem Abschätzen von Winkeln erleichtern Hilfslinien, die von bestimmten Sternbildern ausgehen, das Auffinden von Sternen.

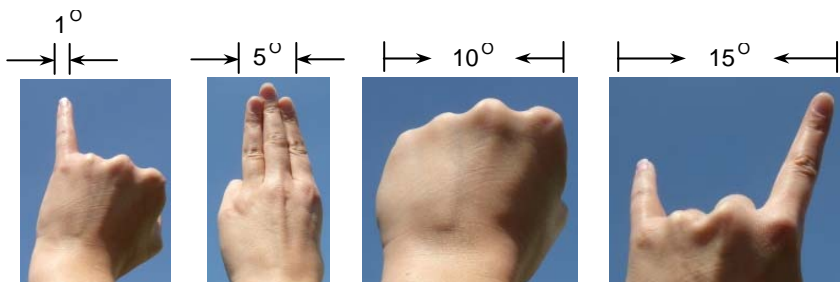
Die zwei folgenden Abbildungen sollen als Anregung für Folien oder Kopiervorlagen dienen.



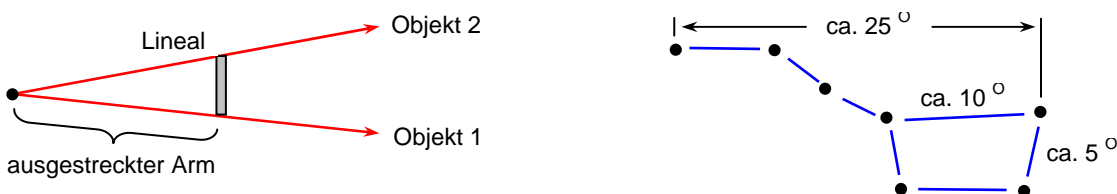
Die Umgebung des Großen Wagens



Für Winkelabschätzungen wird häufig die im Folgenden dargestellte Methode verwendet. Dabei peilt man die Objekte mit ausgestrecktem Arm an.



Eine Verbesserung lässt sich erzielen, indem man ein einfaches Lineal verwendet. Der Winkelabstand zweier Objekte wird dann auf einfache Weise mit bekannten Abständen zum Beispiel im Großen Wagen verglichen werden.



Bei allen Beobachtungsabenden ist selbstverständlich die drehbare Sternkarte mit im Gepäck, auch weil sich ihre Verwendung vor Ort am besten erklären und üben lässt.

Empfehlenswert ist das Arbeiten in Gruppen. Während die eine Gruppe am Fernrohr beschäftigt ist, kann die andere Gruppe Objekte am Himmel suchen, eine dritte übt das Abschätzen von Winkeln. Mehr als drei Gruppen sind in der Regel nicht zweckmäßig.

Für weitere Informationen wird zum Beispiel verwiesen auf Paech, Baader, „Tipps und Tricks für Sternfreunde“, Neuauflage angekündigt (Baader-Planetarium, Stand Dezember 2008).

2.2 Beobachtungsobjekte

Naheliegend sind zunächst der Erdmond und einzelne Planeten. Deren Beobachtung richtet sich nach ihrer Sichtbarkeit, über die man sich am besten in einem der gängigen Astronomie-Jahrbücher informiert. Die beste Zeit für eine Mondbeobachtung liegt etwa im Bereich der Halbmondphase, weil sich dann Mondkrater an der Hell-Dunkel-Grenze besonders kontrastreich abheben.

Schon mit kleinen Instrumenten lassen sich auch die vier großen Jupitermonde beobachten. Wenn es zeitlich gerade passt, ist das Eintauchen von einem der Monde in den Schattenbereich von Jupiter (bzw. das Auftauchen aus diesem) ein bemerkenswertes Erlebnis, gerade weil Olaf Römer diesen Prozess zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nutzte.

Darüber hinaus gibt es viele weitere lohnende Beobachtungsobjekte. Die folgende Auswahl ist als Anregung gedacht. Sie bedeutet nicht, dass alle Objekte auch aufgesucht werden müssen. Als Hilfsmittel sind eine drehbare Sternkarte und ein guter Sternatlas unerlässlich. Einige der vorgeschlagenen Objekte kommen übrigens gerade bei schwacher Vergrößerung besonders gut zur Geltung.

Für eine optimale abendliche Beobachtung ist jeweils die günstigste Jahreszeit angegeben: H (Herbst), W (Winter), F (Frühjahr), S (Sommer). Der Sommer ist der Vollständigkeit halber aufgeführt, obwohl eine Sommerbeobachtung zusammen mit Schülerinnen und Schülern praktisch nicht in Betracht kommt. Der Zusatz z bezeichnet zirkumpolare Objekte. Selbstverständlich gelingt die Beobachtung dieser Objekte um so besser, je weniger das Streulicht des Mondes stört.

Sternbild	Zeit	Beachtenswerte Objekte	
Großer Bär Ursa Major	z	ζ UMa M 81 M 82	Mizar, erstes teleskopisch entdecktes Doppelsternsystem schöne Spiralgalaxie schon für das kleinere Teleskop Nachbargalaxie von M 81, dunkler
Kassiopeia Cassiopeia	z	η Cas	schönes Doppelsternsystem
Kleiner Bär Ursa Minor	z	α UMi	Polaris, der Polarstern, Cepheide mit geringer Helligkeitsschwankung, Doppelstern
Herkules Hercules	S, H	M 13 M 92	hellster Kugelsternhaufen des Nordhimmels, gut zu finden zählt zu den ältesten Kugelsternhaufen
Leier Lyra	S, H	α Lyr ε 1/2 Lyr M 57	Wega, ein Stern des sogenannten <i>Sommerdreiecks</i> gilt als schönstes Vierfachsternsystem Ringnebel NGC 6720, nur für größere Teleskope
Schwan Cygnus	S, H	α Cyg β Cyg	Deneb, ein Stern des <i>Sommerdreiecks</i> Albireo, eindrucksvolles Doppelsternsystem, gut zu trennen
Adler Aquila	S, H	α Aql	Atair, ein Stern des <i>Sommerdreiecks</i>
Füchschen Vulpecula	S, H	M 27	Hantelnebel, großer planetarischer Nebel, für größere Teleskope
Pegasus Pegasus	H	M 15 ε Peg	Kugelsternhaufen, wirkt erst in größeren Teleskopen Enif, Überriese mit Begleitstern, auch für kleinere Fernrohre
Andromeda Andromeda	H	M 31 γ And	die Andromeda-Galaxie, optisch etwas mühsam zu finden Alamak, schönes Dreifachsternsystem

Sternbild	Zeit	Beachtenswerte Objekte (Fortsetzung)
Dreieck Triangulum	H	M33 Spiralgalaxie für das lichtstarke Fernrohr, geringe Vergrößerung
Perseus Perseus	H, W	β Per $h+\chi$ Per Algol, einer der bekanntesten Bedeckungsveränderlichen NGC869, NGC 884, benachbarte offene Sternhaufen
Fuhrmann Auriga	W	α Aur M 36 Capella, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i> NGC 1960, kleiner, heller Sternhaufen für das kleine Fernrohr
Stier Taurus	W	α Tau M 45 Aldebaran, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i> Plejaden, wohl der bekannteste offene Sternhaufen und eines der schönsten Fernglasobjekte im Umfeld von Aldebaran. Hyaden, großer, heller Sternhaufen mit ca. 5 ^o Durchmesser
Orion Orion	W	α Ori β Ori M 42, M 43 Beteigeuze, pulsierender roter Überriese, Farbunterschied zu Rigel, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i> der Orionnebel, schönster Gasnebel am Himmel
Großer Hund Canis Major	W	α CMa M 41 Sirius, hellster Fixstern, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i> großer, heller Sternhaufen, gut zu finden
Kleiner Hund Canis Minor	W, F	α CMi Procyon, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i>
Zwillinge Gemini	W, F	α Gem β Gem M 35 Castor, Vielfachsternsystem Pollux, ein Stern des <i>Wintersechsecks</i> NGC 2168, großer heller Sternhaufen, gut zu finden
Einhorn Monocerus	W, F	β Mon M 50 eines der schönsten Dreifachsternsysteme, kleines Fernrohr großer Sternhaufen, lohnend für nicht zu kleine Fernrohre
Krebs Cancer	W, F	M 44 Praesepe, ausgedehnter Sternhaufen, lohnendes Fernglasobjekt
Löwe Leo	W, F	α Leo γ Leo Regulus schönes Doppelsternsystem für kleine Fernrohre
Jungfrau Virgo	F	einzelne Galaxien des Virgo-Haufens, nur für größere Teleskope
Bootes Bootes	F	α Boo Arctur
Skorpion Scorpius	S	α Sco ξ Sco M 6 M 7 Antares, roter Überriese bekanntes Mehrfachsternsystem eindrucksvoller Kugelsternhaufen großer Sternhaufen dichte Milchstraßenregion, viele lohnende Objekte
Schütze Sagittarius	S	M 8 Lagunennebel, reizvoll auch für kleinere Fernrohre dichte Milchstraßenregion, viele lohnende Objekte

Quellen: Ridpath, Tirion, „Der große Kosmos Himmelsführer“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 1987
Keller, „Kosmos Himmelsjahr 2006“, Franckh-Kosmos, Stuttgart

2.3 Beobachtungsgeräte

Selbstverständlich soll ein Astrophysik-Kurs nicht als „Trockenschwimm-Kurs“ abgehalten werden. Deshalb wird man langfristig das Ziel haben, die Schule mit einem leistungsfähigen Teleskop auszustatten.

Zunächst sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die erfolgreiche Realisierung eines Astrophysik-Kurses nicht an die Existenz einer umfangreichen Gerätschaft oder gar an eine schuleigene Beobachtungskuppel gebunden ist.

Ein normales Fernglas ist für viele Gelegenheiten ein sehr hilfreiches Instrument.

Die folgende Zusammenstellung ist als kurzer Leitfaden für die Beschaffung und den Einsatz von Beobachtungsinstrumenten zu verstehen. Für deren Anschaffung kommen der normale Etat der Schule oder auch Elternspenden in Frage.

Anforderungen an ein Schulteleskop

- Der wichtigste Aspekt ist sicher, dass die Schülerinnen und Schüler einige der im Unterricht behandelten Objekte **selbst beobachten** können.
- Wenn die Beobachtungsbedingungen auf dem Schulgelände schlecht sind, ist es ausgesprochen hilfreich, wenn das Teleskop **einfach zu transportieren und zu justieren** ist.
- Das Teleskop sollte so ausgelegt sein, dass es in Verbindung mit der erforderlichen Zusatzausrüstung eine einfache **Astrophotographie** möglich macht (z. B. auch für Arbeitsgemeinschaften oder Projekte).

Begriffsklärung

Öffnung (Apertur) = Objektiv- bzw. Spiegeldurchmesser

Vergrößerung = Objektivbrennweite dividiert durch die Okularbrennweite

Öffnungsverhältnis = Öffnung D zu Brennweite f

Eine Übersichtsformel für das Auflösungsvermögen in Bogensekunden (zugrundegelegte Wellenlänge 560 nm): Auflösungsvermögen = $14''$ dividiert durch die Öffnung (cm-Wert)

Linsenfernrohre (Refraktoren)

Einfachste Bauart: Nur eine Frontlinse, deutlicher Farbfehler (chromatische Aberration), für eine auf längere Zeit befriedigende Beobachtung oder gar für Astrophotographie nicht empfehlenswert.

Achromat: Farbfehler geringer durch achromatisches Objektiv, jedoch nicht vollständig beseitigt, für Planetenbeobachtung und Astrophotographie kaum empfehlenswert.

ED-Refraktor: Sehr gute Farbkorrektur durch Spezialgläser (ED steht für „Extra low Dispersion“), für Planetenbeobachtung und Astrophotographie gut geeignet.

Apochromat: Hervorragende Qualität, praktisch farbfehlerfrei durch apochromatisches Objektiv, beste Wahl für anspruchsvolle Astrophotographie, aber sehr teuer.

Infolge des geschlossenen Tubus sind Refraktoren pflegeleicht, Feuchtigkeit und Staub können kaum eindringen und ihre Optik muss nur selten nachjustiert werden. Sie sind wenig

empfindlich gegenüber plötzlichen Temperaturschwankungen und deshalb schnell einsatzbereit. Um ein Beschlagen der Frontlinse zu unterbinden, sollte man stets mit aufgesetzter Taukappe arbeiten.

Für die Beobachtung von Planeten und lichtschwachen Objekten empfiehlt sich eine Objektivöffnung ab 80 mm aufwärts. Ordentlich farbkorrigierte Refraktoren mit großer Öffnung sind nicht unbedingt handlich. Sie liefern aber ausgesprochen scharfe und kontrastreiche Bilder (ideal für Sonnenbeobachtung).

Generell gilt: Bei gleicher Öffnung ist ein gutes Linsenfernrohr einem Spiegelteleskop überlegen, aber auch erheblich teurer.

Newton-Spiegelteleskope (Reflektoren)

Spiegelteleskope weisen prinzipiell keinen Farbfehler auf, haben jedoch häufig eine andere optische Unzulänglichkeit (Koma): Sterne, die abseits der Bildmitte liegen, sehen kometenartig verzerrt aus. Auch muss bei Spiegeln mit kleinem Öffnungsverhältnis die Optik in gewissen Zeitabständen genau justiert werden, um die maximale Auflösung zu erhalten. Da sich Fangspiegel und Okular in der Nähe der Lichteintrittsöffnung befinden, ergibt sich aber eine bequeme Einblicksposition.

Bei Öffnungen von mehr als acht Zoll werden auch Reflektoren groß und schwer. Fangspiegel und Halterung bewirken eine zentrale Abschattung des Strahlengangs. Dadurch reduziert sich die Öffnung und der Kontrast sowie die Auflösung werden vermindert.

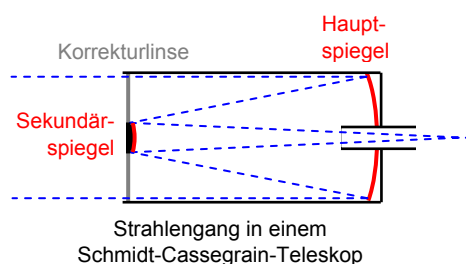
Plötzliche Temperaturschwankungen führen im Tubus manchmal zu unerwünschten Luftströmungen. Das Gerät ist dann erst nach einer entsprechenden Temperaturanpassung einsatzbereit, was eine gewisse Wartezeit mit sich bringt.

Katadioptrische Teleskope

Diese Bauart zeichnet sich durch eine Kombination von Linsen- und Spiegelsystemen aus. Am unteren Ende des Tubus befindet sich der übliche Spiegel, der allerdings mit einer kreisförmigen Bohrung versehen ist. Das obere Ende des Tubus ist durch eine Linse zur Korrektur des Koma-Fehlers abgedeckt, die zugleich einen Sekundärspiegel trägt. Dieser lenkt das Licht zum Okular.

Durch die zweifache Reflexion des Lichts ergibt sich eine sehr kompakte Bauweise. Zu den häufigsten Vertretern zählen das Schmidt-Cassegrain-System und das Schmidt-Maksutow-System.

Zum Scharfstellen wird nicht das Okular, sondern der Hauptspiegel bewegt. Da der Sekundärspiegel einen Teil der Lichteintrittsöffnung verdeckt, kommt es bei einem „Kat“ ebenfalls zu einer geringfügigen Minderung von Kontrast und Auflösung. Infolge des geschlossenen Tubus ist auch dieser Teleskoptyp pflegeleicht.



Ferngläser

sind hervorragende Anfängerinstrumente und wegen des großen Gesichtsfeldes gerade für die Beobachtung flächiger Objekte (z. B. offene Sternhaufen) bestens geeignet.

Das Betrachten mit beiden Augen gleichzeitig ist besonders angenehm und erhöht sowohl den Kontrast- als auch den Schärfeeindruck. Bewährt haben sich Instrumente des Typs

10 x 50 (Vergrößerung x Objektivdurchmesser in mm) und vor allem sogenannte Nachtgläser, zum Beispiel ein 9 x 63.

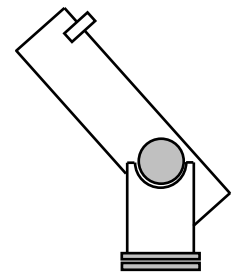
Ab 10-facher Vergrößerung muss das Fernglas auf ein stabiles Stativ mit Kugelkopf montiert werden, um der „Verwackelung“ entgegen zu wirken. Und spätestens in dieser Situation macht sich ein gravierender Nachteil bemerkbar: Beim Beobachten zenitnaher Objekte werden Nacken und Hals auf Dauer recht unangenehm strapaziert.

Ein Wort zur Montierung

Erst eine *solide, stabile Montierung* macht ein sinnvolles Arbeiten möglich. Auch wenn eine gute Montierung nicht billig ist, hier darf auf keinen Fall gespart werden!

Eine einfache, leicht zu transportierende azimutale Montierung ist die Dobson-Montierung, die in Verbindung mit einem Newton-Teleskop Verwendung findet.

Bewährt haben sich parallaktische Montierungen. Es bedarf zwar einer gewissen Ausdauer, eine parallaktische Montierung genau zu justieren. Dafür hat sie jedoch den Vorteil, dass sich der Teleskoptubus leicht abnehmen und getrennt von der Montierung transportieren lässt.



Newton-Spiegel auf Dobson-Montierung

Katadioptrische Teleskope werden häufig in Verbindung mit einer Gabelmontierung angeboten. Da eine einfache Demontage von Gabel und Tubus in der Regel nicht möglich ist, kann sich schnell ein „unangenehmes“ Transportgewicht ergeben. Eine Gabelmontierung ist aber gerade in Verbindung mit einer Computersteuerung (eventuell mit Go-to-Funktion) sehr einfach zu bedienen. Auch für den Astrophotographen ist eine motorgetriebene Nachführung unbedingt zu empfehlen.

Größere Instrumente (etwa ab 30 cm Öffnung bei Spiegelsystemen beziehungsweise ab 1,5 m Tubuslänge bei Refraktoren) erfordern eine feste Aufstellung und damit in der Regel auch einen Schutzbau. Obwohl beides viele Vorteile aufweist, muss an dieser Stelle mit Nachdruck betont werden, dass es für den reinen Schulbetrieb wesentlich sinnvoller ist, auf ein größeres Instrument und die damit verbundenen Maßnahmen zu verzichten und die nicht beanspruchten finanziellen Mittel zum Kauf zusätzlicher kleiner Instrumente zu verwenden (deutlich effizientere Nutzung der Beobachtungszeiten, Geräteverleih an Schülerinnen oder Schüler möglich).

Gesichtsfeld

Zur Bestimmung des Gesichtsfeldes eines Fernrohrs mit gegebenem Okular wählt man zwei weit entfernte Punkte so aus, dass ihre bekannte Verbindungsstrecke senkrecht zur Blickrichtung steht und diese beim Durchschauen gerade den Durchmesser des Gesichtsfeldes bestimmt.

Ist d die Länge der Verbindungsstrecke und a ihr Abstand zum Fernrohr, so erhält man den (kleinen) Gesichtsfeldwinkel aus $\tan \omega = d/a$.

Als Richtwert ergibt sich für das Celestron C8 bei 80-facher Vergrößerung etwa $\omega = 0,6^\circ$. Da der Winkeldurchmesser der Sonne und des Vollmondes etwa $32'$ beträgt, sind beide in voller Größe beobachtbar.

Zum Vergleich: Die Himmelskugel überdeckt eine Fläche von etwa $2,1 \cdot 10^5$ Vollmondflächen. Während man mit dem bloßen Auge nur wenige Tausend Sterne insgesamt als Lichtpunkte erkennen kann, sind es mit Fernrohren deutlich mehr.

Bloßes Auge:	durchschnittlich ca. 0,02 Sterne pro Vollmondfläche
Celestron C8:	durchschnittlich ca. 40 Sterne pro Vollmondfläche
Große Teleskope:	durchschnittlich ca. 10000 Sterne pro Vollmondfläche

Ergänzungen

Für den reinen Schulgebrauch haben sich mobile Schmidt-Cassegrain-Teleskope mit etwa acht Zoll Öffnung sehr bewährt. Die Vorzüge sind eine hohe Lichtstärke (Grenzgröße für Sterne bei $m = 13$), ein hinreichend gutes Auflösungsvermögen (ca. 1", also in der Größenordnung der durch Luftunruhe begrenzten Auflösbarkeit), sehr gute Handlichkeit sowie eine gutes Preis-Leistungs-Verhältnis.

Wenn es sich einrichten lässt, sollte die Kursleiterin oder der Kursleiter ein mobiles Teleskop zeitweise mit zu sich nach Hause nehmen. Dies hat folgende Vorteile:

- Lehrkräfte erhalten die Möglichkeit, selbst in Ruhe zu lernen und zu üben;
- das Teleskop wird intensiver genutzt;
- das Teleskop kann auch außerhalb der Öffnungszeiten der Schule genutzt werden.

Wenn es gilt, die Anschaffung eines Teleskops zu begründen, lassen sich auch die Verwendungsmöglichkeiten außerhalb des Astrophysikkurses als Argument anführen. Eine zusätzliche Nutzung des Instruments ist z. B. im Physikunterricht der Mittelstufe, durch eine Astronomie-Arbeitsgruppe, durch interessierte Kollegen oder durch eine an der Schule existierende Photogruppe denkbar. Der Adressatenkreis ist jedenfalls nicht so eng, wie es zunächst den Anschein hat.

Kommt der Neukauf eines Teleskops aus finanziellen Gründen nicht in Frage, sollte man unbedingt nachfragen, ob Eltern ein nicht oder kaum benutztes Gerät besitzen und dieses eventuell der Schule zur Verfügung stellen wollen (Anfrage in einem der obligaten Rundschreiben). Auch die Zusammenarbeit mit einer Volkshochschule oder Volkssternwarte der näheren Umgebung sollte abgeklärt werden. Vielleicht lassen sich auch über Fördervereine beziehungsweise durch Spenden Ferngläser oder kleine Refraktoren anschaffen, die dann in Verbindung mit Arbeitsaufträgen wechselnd an Schülergruppen verliehen werden (Sonnenbeobachtung aus Sicherheitsgründen ausgenommen!). Auf die guten Erfahrungen, die mit dem Ausleihen solcher Geräte gemacht wurden, sei hier ausdrücklich hingewiesen.

Vorsicht vor dem Erwerb eines Billigteleskops: Es kann bei kleinem Budget zwar einen akzeptablen Einstieg bieten, wird jedoch langfristig wenig zufrieden stellen (häufig unzureichende Montierung, eventuell Kompatibilitätsprobleme beim Nachrüsten von Zubehör). Auch wenn ausschließlich mit der tollen Vergrößerung eines Geräts geworben wird, ist eine gewisse Zurückhaltung zu empfehlen.

Besitzt die Schule ein Teleskop mit automatischer Nachführung, eröffnen sich auch interessante Möglichkeiten der Astrophotographie. Hierzu wird auf das große Angebot an spezieller Literatur verwiesen.

- Quellen: Mollis, „Astronomie heute“, Juni 2006, S. 64 - 67
 Peach, „Technik, Tipps und Tricks zu Sonnenbeobachtungen“, zu finden auf www.baader-planetarium.de
 Schröder, „Sterne und Weltraum“, Basics 1/2004, S. 21 - 23
 Seip, „Astronomie heute“, März 2006, S. 70 - 73
 Ting, „Astronomie heute“, April 2006, S. 62 - 68, sowie Astronomie heute, Mai 2006, S. 64 - 67
 Beckmann, Epperlein, „Astronomie Grundkurs“, Manz Verlag, München 1989

2.4 Sonnenbeobachtung

Niemals darf ohne Schutzvorrichtung auch nur flüchtig durch das Okular eines auf die Sonne ausgerichteten Teleskops geblickt werden! Schlimmste Augenschäden bis hin zur Erblindung können die Folge sein.

Die Wahl des Instruments

Die Sonne ist der einzige Stern, auf dessen Oberfläche sich auch mit schulischen Mitteln Details beobachten lassen. Grundsätzlich sind dafür alle Teleskoptypen geeignet, sofern man die Schutzhinweise der Hersteller genauestens beachtet.

Wegen der hohen Leuchtkraft der Sonne sind Instrumente mit kleiner Öffnung bereits völlig ausreichend. Die Forderung nach einem Auflösungsvermögen von wenigstens 2 Bogensekunden führt jedoch auf einen Objektivdurchmesser von etwa 100 mm.

Spiegelteleskope weisen gegenüber Refraktoren einen geminderten Kontrast auf. Will man die Sonnengranulation sehen oder im H_{α} -Licht beobachten, ist die hohe Kontrastleistung eines Refraktors von Vorteil.

Unabhängig vom Teleskoptyp gilt: Da Streulicht nicht stören kann, ist kein spezieller Standort erforderlich.

Schutzmaßnahmen für eine sichere Sonnenbeobachtung

- a) Die Verwendung eines Objektivfilters (aus metallbeschichtetem Glas oder Polymerfolie)

Diese im Fachhandel erhältlichen **Filter werden vor der Lichteintrittsöffnung des Instruments montiert** (niemals am Okular!) und schirmen nahezu 100 % der Strahlungsenergie ab. Es ist auf einen festen Sitz des Filters zu achten, und man sollte ihn **unbedingt mit Klebeband fixieren**, um ein unbeabsichtigtes Abstreifen z. B. durch Wind oder Schülerinnen bzw. Schüler zu verhindern.

Sogenannte **Okularfilter** (sie werden gelegentlich bei Billigteleskopen mitgeliefert) sind in unmittelbarer Nähe des Teleskopbrennpunkts angeordnet. Wegen der extremen Wärmebelastung können sie ohne Vorwarnung zerspringen und sollten deshalb **unter keinen Umständen verwendet** werden.



- b) Die Projektionsmethode

Hierbei wird die Sonne durch Objektiv und Okular auf einen Schirm abgebildet. Diese Methode ist nur für Refraktoren geeignet und auch hier nur für kurze Zeit, bei einem Reflektor würde sich der Spiegel zu stark erwärmen. Das Objektiv ist auf etwa 30 mm abzublenden. Außerdem sollten nur unverkittete Okulare verwendet werden, da



andernfalls wegen der starken Wärmeentwicklung ein Schmelzen der Kittschichten nicht auszuschließen ist.

Ein deutlich kontrastreicheres Bild ergibt sich, wenn man das direkt auf den Beobachtungsschirm fallende Sonnenlicht durch einen großen Karton zusätzlich abschirmt.

Ein besonderer Vorteil dieser Methode ist, dass die Beobachtung nicht einzeln, sondern gleich in Gruppen erfolgt, was die Beobachtungszeit deutlich verringert.

Vor allen weiteren Maßnahmen, insbesondere vor Billiglösungen (dunkle Filmstreifen, berußte Glasplatten, Beobachtung durch eine CD hindurch, Rettungsfolie, Schweißerbrille) wird dringend gewarnt. Da sie meist die schädlichen Ultraviolett- und Infrarotanteile nicht herausfiltern und eventuell der starken Erwärmung nicht standhalten, sind sie als äußerst gefährlich einzustufen.

Bei jeder Sonnenbeobachtung muss auch an ein eventuell vorhandenes Sucherfernrohr gedacht werden. Man nimmt es am besten ab, da es ohnehin nicht benötigt wird. Die korrekte Ausrichtung des Teleskops erfolgt am einfachsten über die Minimierung seines Schattens.

Selbstverständlich darf man das aufgebaute Teleskop niemals unbeaufsichtigt stehen lassen.

Die spektralen Beobachtungsbereiche

Mit schulischen Mitteln ergeben sich zwei Möglichkeiten:

- a) Bei einer Beobachtung im sogenannten Weißlicht (kontinuierlicher Spektralbereich von ca. 380 nm bis 750 nm) betrachtet man die Photosphäre der Sonne. Es zeigen sich Sonnenflecken, die Randverdunklung, helle Fackelgebiete und (bei größeren Teleskopen) die Sonnengranulation.
- b) Bei einer H_{α} -Beobachtung (enger Spektralbereich um die H_{α} -Linie von Wasserstoff) betrachtet man die Chromosphäre der Sonne. Es zeigen sich Protuberanzen bzw. Filamente, chromosphärische Fackelgebiete und mit etwas Glück Sonnenflares. Für diese Beobachtungsform ist ein H_{α} -Filter erforderlich (nicht billig).

Quellen: Delfs, „Sterne und Weltraum“, Juni 2007, S. 63

Fienberg, „Astronomie heute“, März 2006, S. 16 - 19

Peach, „Technik, Tipps und Tricks zu Sonnenbeobachtungen“, zu finden auf www.baader-planetarium.de

Schröder, „Sterne und Weltraum“, Basics 1/2004, S. 21 - 23

2.5 Astronomie-Fachhandel

Die folgende Liste beruht auf Vorschlägen von Kollegen und ist bewusst knapp gehalten. Sie enthält eine Auswahl an Firmen, über die Teleskope, Okulare, Montierungen sowie weiteres Astronomiezubehör bezogen werden können.

ASTROCOM GmbH Mario Costantino	Fraunhoferstraße 14, 82152 Martinsried (0 89) 8 58 36 60	www.astrocom.de service@astrocom.de
Astroshop.de nimax GmbH	Siemensstr. 12, 86899 Landsberg (0 8191) 9 15 97 - 3	www.Astroshop.de service@astroshop.de
Baader-Planetarium	Zur Sternwarte, 82291 Mammendorf (0 81 45) 88 02	www.baader-planetarium.de service@baader-planetarium.de
Fernrohrland	Max-Planck-Str. 28, 70736 Fellbach (07 11) 9 57 60 - 17	www.fernrohrland.de info@fernrohrland.de
INTERCON SPACETEC	Gablinger Weg 9, 86154 Augsburg (08 21) 41 40 81	www.intercon-spacetec.de info@intercon-spacetec.de
Kaps Optik GmbH	Am Schanzl 8, 94032 Passau (08 51) 9 29 99 - 0	www.kaps.de service@kaps.de
Teleskop-Service	Keferloher Marktstraße 19 c 85640 Putzbrunn/Solalinden (0 89) 18 92 87 - 0	www.teleskop-service.de info@teleskop-service.de

2.6 Astronomische Vereine, Sternwarten und Planetarien

Unter www.astronomie.de/gad ist eine umfangreiche Übersicht zu Volkssternwarten, Planetarien, astronomischen Vereinen, Astronomie an Schulen, privaten Sternwarten, astronomischer Forschung etc. zu finden.

Der Autor David Przewozny schreibt in seinen Infos: „Das GAD (German Astronomical Directory) ist eine Datenbank aller astronomischen Einrichtungen im deutschsprachigen Raum“. Dank der Möglichkeit, Postleitzahlen-Bereiche auszuwählen, lassen sich geeignete Kontaktadressen leicht finden. In vielen Fällen ist zusätzlich ein Link angegeben, der ohne Umschweife auf die zugehörige Internetseite führt.

Wenn es vom Aufwand her in Betracht kommt, kann man auch einen Besuch im Observatorium Wendelstein (bei Bayrischzell) der Universitäts-Sternwarte München (www.wendelstein-observatorium.de) in Erwägung ziehen. Dort werden Führungen angeboten, die Einblicke in moderne astrophysikalische Forschungsmethoden und Ergebnisse ermöglichen. Da es sich hier um ein wissenschaftliches Institut handelt, können diese Führungen nur tagsüber stattfinden, die Nächte sind dem Forschungsbetrieb vorbehalten.

3 Ergänzungen



Catseye-Nebula / NASA, ESA, HEIC, Hubble Heritage Team (STScI / AURA)

3 Ergänzungen

3.1 Anmerkungen zum Lehrplanabschnitt 10.1 (Astronomische Weltbilder)

Diese Thematik ist sehr facettenreich und eignet sich hervorragend für eine arbeitsteilige Erarbeitung in Gruppen.

Neben dem eingeführten Lehrbuch und Internetquellen können hierfür zum Beispiel die Darstellungen in folgenden Lehrbüchern als Grundlage dienen:

Kuhn, „Lehrbuch der Physik“, Band 2, Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig 2000

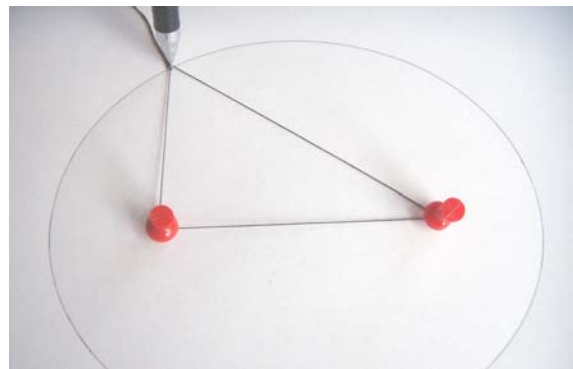
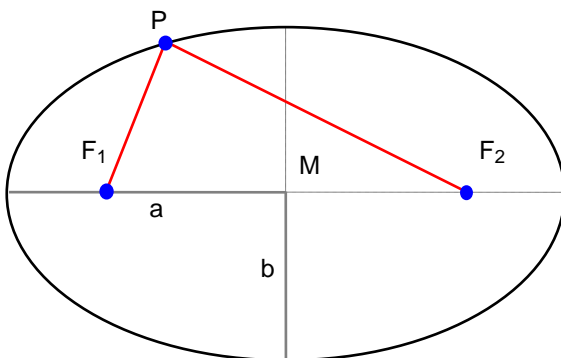
Grehn, Krause, „Metzler Physik“, Schroedel Schulbuchverlag, Braunschweig 2007.

Hilfreiche Applets findet man unter www.schulphysik.de/java/physlet/index.html.

Wenn es sich einrichten lässt, ist der Besuch der Ausstellung „Weltbild im Wandel“ im Deutschen Museum in München sehr empfehlenswert. Auch der Ausstellungsbesuch sollte mit konkreten Arbeitsaufträgen für die einzelnen Schülergruppen verbunden sein.

Grundkenntnisse über Ellipsen

Zu den grundlegenden Eigenschaften einer Ellipse gehört die Beziehung $\overline{F_1P} + \overline{F_2P} = 2a$. Sie ist die Grundlage für die sogenannte Gärtnerkonstruktion, welche die Schülerinnen und Schüler nach Möglichkeit selbst einmal durchgeführt haben sollten. Dazu werden ein Holzbrett als Unterlage, zwei Nadeln für eine Pinwand, ein etwas festeres Nähgarn sowie ein Blatt Papier und ein Bleistift benötigt. Die Photographie zeigt die Umsetzung der Konstruktion.



Im Zusammenhang mit den Grundeigenschaften von Ellipsen sei nochmals auf die Darstellungsmöglichkeiten einer dynamischen Geometrie-Software (siehe **CD** Zusatzmaterial, Ellipse_allgemein.ggb) hingewiesen.

Zur Arbeit von Johannes Kepler

Keplers Bestrebungen, die Bewegung der damals bekannten sechs Planeten mit einfachen Gesetzen zu beschreiben, waren von der tiefen Überzeugung von einer göttlichen Harmonie und der Bedeutung der platonischen Zahlen und Körper geleitet.

So stellte er 1596 in seinem ersten Buch „Mysterium Cosmographicum“ die sechs Planetensphären durch die fünf regelmäßigen platonischen Körper getrennt dar. Dabei waren ihm die relativen Distanzen im Sonnensystem, die bereits von Copernicus angegeben wurden, bekannt.

Mit dem Auftrag zur Entwicklung einer neuen Marstheorie stand Kepler das gesamte Beobachtungsmaterial von Tycho Brahe zur Verfügung. Brahe hatte bei seinen Beobachtungen eine Genauigkeit im Bereich von einer Bogenminute erzielt. Die Abweichungen der von Kepler vorausgesetzten exzentrischen Kreisbahn von Brahes Messwerten führten 1604 letztendlich zur Vorstellung einer elliptischen Bahnform. Hierzu schreibt Kepler in der 1609 veröffentlichten „Astronomia Nova“: „So hat mich die Einsicht nicht wenig gekostet, dass die Ellipse neben der Schwankung bestehen kann, wie sich in folgendem Kapitel zeigen wird. Dasselbst wird auch der Beweis geführt werden, dass für den Planet keine andere Bahnfigur übrig bleibt, als eine vollkommene Ellipse...“. Die Bezeichnung „Planet“ bezieht sich zwar zunächst nur auf den Mars, jedoch spricht viel dafür, dass Kepler damit alle Planeten gemeint hat. Im Zusammenhang mit elliptischen Bahnen erfolgt auch die Abkehr von konstanten Bahngeschwindigkeiten, die sich schließlich im 2. Keplerschen Gesetz niederschlägt.

Zu seinem 3. Gesetz schreibt Kepler in dem Werk „Harmonices Mundi libri V“:

„In einem höheren Maße als ich je hoffen konnte, habe ich als durchaus wahr und richtig erkannt, dass sich die ganze Welt der Harmonik, so groß sie ist, mit allen ihren im III. Buch auseinandergesetzten Teilen bei den himmlischen Bewegungen findet, zwar nicht in der Art, wie ich mir vorgestellt hatte (und das ist nicht der letzte Teil meiner Freude), sondern in einer ganz anderen, zugleich höchst ausgezeichneten und vollkommenen Weise. In der Zwischenzeit, in der mich die höchst mühsame Verbesserung der Theorie der Himmelsbewegungen in Spannungen hielt, kam zu besonderer Steigerung meines leidenschaftlichen Wissensverlangens und zum Ansporn meines Vorsatzes die Lektüre der harmonischen Schrift des Ptolemäus hinzu; Darin fand ich wider Erwarten und zu meiner höchsten Verwunderung, dass sich fast das ganze III. Buch schon vor 1500 Jahren mit einer gleichen Betrachtung der himmlischen Harmonie beschäftigte. Allein es fehlte zu jener Zeit der Astronomie noch vieles. Daher konnte Ptolemäus, der die Sache erfolglos angefasst hatte, ihre Aussichtslosigkeit anderen vorhalten.“

Die geniale Leistung Keplers bestand darin, dass er sich bei seiner Arbeit von dem Ballast der damaligen Vorstellungen über das Planetensystem befreit hat. Insofern kann seine Arbeitsweise auch heute noch als beispielhaft gelten. In seinen Überlegungen versuchte er stets, seine Theorie mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen.

Quellen:

Kepler, „Weltharmonik“, Oldenbourg Verlag, München 1982

Kolde, „Astronomie“, Diesterweg Frankfurt

Teichmann, „Wandel des Weltbildes“, Teubner Verlag, Stuttgart Leipzig 1999

3.2 Zeittafel zur Astronomie

Von den Anfängen bis zur Neuzeit

4. bis 1. Jahrtausend v. Chr.	Astronomische Beobachtungen in Babylonien, Ägypten, China und Mittelamerika; Sternbildnamen; Kalender Die Kenntnis der Rhythmen von Planeten, von Sonnen- und Mondfinsternissen ermöglichte erste astronomische Voraussagen.
6. und 5. Jh. v. Chr.	Pythagoreer: Kugelgestalt und Eigenrotation der Erde
3. Jh. v. Chr.	Eratosthenes: Bestimmung des Erdradius Aristarch von Samos: Mond- und Sonnenentfernung, heliozentrisches System
2. Jh. v. Chr.	Hipparch: Sternkatalog, Entdeckung der Präzession
um 140 n. Chr.	Ptolemäus: Geozentrisches System, Handbuch der Astronomie (Almagest)
9. bis 15. Jh.	Araber: Namen der wichtigsten Sterne; Sternwarten in Bagdad und Kairo; Weiterentwicklung der trigonometrischen Tafeln, der Sternkataloge und der astronomischen Instrumente

16. bis 19. Jahrhundert

1543	Hauptwerk von Kopernikus (1473 - 1543) erscheint; heliozentrisches Weltbild; kopernikanische Wende
um 1572	Brahe (1546 - 1601): Überaus genaue und umfassende Messungen von Planetenpositionen ohne Fernrohr
1609	Kepler (1571 - 1630): Veröffentlichung des Ellipsen- und des Flächengesetzes (gefunden durch Auswertung von Brahes Messungen)
1611	Kepler-Fernrohr (Refraktor)
1619	Veröffentlichung des 3. Kepler-Gesetzes
1609	Galilei (1564 - 1642): Beobachtung der Jupitermonde, Sonnenflecken, Mondgebirge und Venusphasen mit dem sogenannten holländischen Fernrohr
1610/1611	Entdeckung von Sonnenflecken
1671	Cassini (1625 - 1712): Entdeckung der Teilung des Saturnrings und von vier Saturnmonden
1676	Römer (1644 - 1710): Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungszeiten der Jupitermonde
1687	Newton (1643 - 1727): "Philosophiae naturalis principia mathematica" enthält das Gravitationsgesetz.
1706	Halley (1656 - 1742): Bahnberechnung von Kometen
1718	Entdeckung der Eigenbewegung von einigen Fixsternen
1781	Herschel (1738 - 1822): Entdeckung von Uranus
1803	Physikalische Natur von Doppelsternen wird erkannt.
1784	Messier (1730 - 1817): Katalog von 103 nebelartigen Objekten

19. und 20. Jahrhundert

1814	Fraunhofer (1787 - 1826): Entdeckung von Absorptionslinien im Sonnenspektrum
1838	Bessel (1784 - 1846): Bestimmung der Fixsternparallaxe von 61 Cygni
1846	Galle (1812 - 1910): Entdeckung von Neptun (Grundlage war die aus Bahnstörungen des Uranus erstellte Ortsberechnung durch U. Leverrier.)
1847	Schwabe (1789 - 1875) erkennt einen etwa elfjährigen Sonnenfleckenzyklus
1859	Kirchhoff (1824 - 1887) und Bunsen (1811 - 1899): Spektralanalyse
1879	Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann
ab 1881	Spektralphotometrie, Photographie
1893/1894	Wiensches Verschiebungsgesetz
1900	Max Planck (1858 - 1947): Strahlungsgesetz
1906	Schwarz (1873 - 1916): Theorie zu Sternatmosphären
1913	Russell (1877 - 1957): Hertzsprung - Russell - Diagramm
1915	Einstein (1879 - 1955): Allgemeine Relativitätstheorie
1918	Shapley (1885 - 1972): Entdeckung des Halos der Milchstraße durch Entfernungsmessungen an Kugelsternhaufen
1922	Friedmann (1888 - 1925): Folgerung eines dynamischen Universums aus der Allgemeinen Relativitätstheorie
1923	Hubble (1889 - 1953): Auflösung von Einzelsternen aus dem Randbereich des Andromeda-Nebels, damit Nachweis von dessen extragalaktischer Natur Erste Entfernungsbestimmungen von Galaxien
1912 bis 1924	Slipher (1875 - 1969): Vermessung der Wellenlängenverschiebung bei Spiralnebeln
1927	Lemaitre (1894 - 1966): Expandierendes Universum
1928	Gamow (1904 - 1968): Entwicklung der Urknall-Theorie
1929	Hubble (1889 - 1953) und Humason (1891 - 1972): Rotverschiebung in Spektren von Galaxien, Zusammenhang mit deren Entfernung
1930	Tombaugh: Entdeckung von Pluto
1931	Chandrasekhar (1910 - 1995): Untersuchung der inneren Struktur Weißer Zwerge
1932	Kosmische Radiostrahlung wird entdeckt (Jansky) Landau: Theorie zu Neutronensternen
1933	Zwicky (1898 - 1974): Stößt bei seinen Untersuchungen von Galaxienhaufen erstmals auf dunkle Materie und prägt diesen Begriff.
1938	Bethe und Weizsäcker: Kernphysikalische Prozesse als Grundlage der Energiefreisetzung bei Sternen
ab 1940	Entwicklung der Radioastronomie
1943/1944	Radarantennen der britischen Flugabwehr erfassen Radiostrahlung von der Sonne.
1946	Entdeckung der Röntgenstrahlung der Sonne
1951	21-cm-Strahlung von interstellarem Wasserstoff wird gefunden.
1954	Nachweis der ersten Radiogalaxie (Cygnus A)
1957	Erster künstlicher Erdsatellit (Sputnik 1)
1959	Hypothese eines von der Sonne ausgehenden Sonnenwinds wird bestätigt
1963	Schmidt: Erster Quasar wird identifiziert.
1965	Penzias und Wilson: Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung Kippenhahn und Weigert: Numerisches Modell zur Sternentwicklung
1968	Bell und Hewish: Erster Pulsar
1969	Armstrong und Aldrin betreten als erste Menschen den Mond. Larson: Aufwändige Berechnungen zur Sternentwicklung

20. Jahrhundert (Fortsetzung) und 21. Jahrhundert

1974/1976	Start der Raumsonden Helios-A und -B zur Erkundung des Sonnenwinds
1977	Start der Voyagersonden zu den äußeren Planeten
1982	Entdeckung materiefreier Bereiche im Universum; erster Hinweis auf wabenartige Verteilungsstruktur von Galaxien
1986	Untersuchung des Kometen Halley mit Hilfe der europäischen Sonde Giotto
1987	Shelton entdeckt Supernova SN1987A in der Großen Magellanschen Wolke.
1989	Start des Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer) Satellit HIPPARCHOS wird in Betrieb genommen.
1990	Das Hubble-Space-Telescope nimmt den Betrieb auf. Start der Sonde Ulysses zur Erforschung des Sonnenwinds, insbesondere über den Polen der Sonne. Start des Röntgensatelliten ROSAT.
1992	Satellit COBE liefert erstmals Informationen zur Mikrostruktur der Hintergrundstrahlung.
1995	Beginn der Untersuchung der Vorgänge auf der Sonnenoberfläche und in der Sonnenatmosphäre mit Hilfe der Sonde SOHO
1998	Das erste der vier Teleskope des VLT geht in Betrieb.
Ende 20. Jh.	Gesicherter Nachweis von Exoplaneten
um 2000	Die Vorstellung der dunklen Energie kommt auf.
2001	Start des Satelliten WMAP zur Vermessung der Hintergrundstrahlung

Quellen und weiterführende Literatur:

Hahn, „Unser Sonnensystem“, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2004

Herrmann, Schwarz, „Astronomie Basiswissen Schule“, paetec, Berlin, Bibl. Institut, Mannheim 2001

Keller, „Astrowissen“, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2003

Nussbaumer, „Das Weltbild der Astronomie“, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2007

Teichmann, „Wandel des Weltbildes“, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig 1999

Literatur und Medien

Das Angebot an Literatur zur Astrophysik ist kaum überschaubar und hinsichtlich des Niveaus sehr unterschiedlich. Die folgende, prägnant gehaltene Auswahl basiert auf Empfehlungen von praktisch unterrichtenden Kolleginnen und Kollegen. Die aufgeführten Materialien und Internetseiten sollen der Ergänzung des Unterrichts dienen oder der Lehrkraft die Möglichkeit zu weiterführender Information bieten.

Materialien, die sich auch für Schülerinnen und Schüler gut eignen, sind mit **S** gekennzeichnet.

Bücher

[L1]	Hahn Unser Sonnensystem Franckh-Kosmos, Stuttgart 2004	ansprechende Aufmachung mit vielen Diagrammen und Bildern, kaum Mathematik
[L2]	Hasinger Das Schicksal des Universums C. H. Beck, München 2007	informativ, setzt astronomisches Grundwissen voraus
[L3]	Feitzinger Galaxien und Kosmologie Franckh-Kosmos, Stuttgart 2007	ansprechende Aufmachung mit vielen Diagrammen und Bildern, kaum Mathematik
[L4]	Herrmann D. B. Die Milchstraße Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003	ansprechende Aufmachung mit vielen Diagrammen und Bildern, kaum Mathematik
[L5]	Herrmann D. B., Schwarz Basiswissen Schule Astronomie paetec, Berlin, Bibl. Institut, Mannheim 2001	S übersichtlich aufgemachtes Kompendium mit vielen Farbgraphiken und Bildern, inkl. CD-Rom
[L6]	Herrmann J. dtv-Atlas zur Astronomie dtv, München 2005	S Klassiker
[L7]	Keller Astrowissen (Zahlen, Daten und Fakten) Franckh-Kosmos, Stuttgart 2003	als Begleitbuch zum Kosmos Himmelsjahr konzipiert
[L8]	Klessen Sternentstehung Elsevier, München 2007	S aus der Reihe „Astrophysik aktuell“, weitere Bände aus dieser Reihe erhältlich bzw. in Vorbereitung
[L9]	Lerner Grundkurs Astronomie Bayerischer Schulbuchverlag, München 1986	S bewährtes, zugelassenes Schulbuch
[L10]	Panek Das Auge Gottes – das Teleskop und die lange Entdeckung der Unendlichkeit Klett-Cotta, Stuttgart 2001	Astronomiegeschichte dargestellt anhand der Erfindung und Weiterentwicklung des Teleskops
[L11]	Ridpath, Tirion Der Kosmos Himmelsführer Franckh-Kosmos, Stuttgart 2004	hilfreiche Daten- und Informationsquelle
[L12]	Schneider Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie Springer, Berlin 2005	vermutlich eines der besten deutschsprachigen Bücher dieser Art, sehr empfehlenswert
[L13]	Singh Big Bang dtv, München 2007	ansprechender, populärwissenschaftlicher Abriss von der antiken Astronomie bis zur modernen Kosmologie

[L14]	Teichmann Wandel des Weltbildes Teubner, Stuttgart, Leipzig 1999	empfehlenswerte Darstellung der historischen Entwicklung
[L15]	Unsöld, Baschek Der neue Kosmos Springer, Berlin, 7. Auflage 2004	bewährtes Hochschul-Standardwerk
[L16]	Weigert, Wendker, Wisotzki Astronomie und Astrophysik – ein Grundkurs Wiley-VCH, Weinheim 2005	sehr empfehlenswertes Grundlagenbuch
[L17]	Zimmermann, Gürtler ABC Astronomie Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 9. Auflage 2008	sehr empfehlenswertes Lexikon

Zeitschriften und Jahrbücher

[L18]	Sterne und Weltraum Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg	Monatszeitschrift mit aktuellen Informationen „aus erster Hand“, sehr empfehlenswert
[L19]	Astronomie heute Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg	„kleine Schwester“ von Sterne und Weltraum, vom Niveau her etwas einfacher gehalten
[L20]	Astronomie + Raumfahrt im Unterricht Friedrich Verlag, Seelze	allgemeine aber auch didaktische Beiträge, Kopiervorlagen und Folien, erscheint zweimonatlich
[L21]	Ahnerts Astronomisches Jahrbuch *) Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg	
[L22]	Friedrich, Friedrich, Schurig Das astronomische Jahr *) Oculum-Verlag, Erlangen	
[L23]	Keller Kosmos Himmelsjahr *) Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart	mit interessanten Monatsthemen

*) Hier ist jeweils die aktuelle Jahreszahl zu ergänzen.

Sternkarten und weitere Medien

[M1]	Drehbare Kosmos-Sternkarte Kosmos Verlag, Stuttgart	S einfach, zum Kennenlernen des Sternhimmels gut geeignet, Ekliptik und Himmelsäquator sehr deutlich hervorgehoben, sehr stabil
[M2]	Drehbare Himmelskarte Oculum-Verlag, Erlangen	etliche Details, insbesondere Fernglasobjekte, optimiert für rote Beleuchtung.
[M3]	Drehbare Sternkarte „Polaris“ Kosmos Verlag, Stuttgart	sehr viele Details, 24-seitiges Begleitheft
[M4]	Große drehbare Sternkarte „Sirius“ Freemedia-Verlag, Bern	sehr viele Details, mit umfangreichem Textheft und diversen Faltblättern
[M5]	Baader-Planetarium	Kombination aus Tellurium und Planetarium, vielseitig einsetzbar

Hinweis: Die früher erhältliche drehbare Projektions-Sternkarte zur Verwendung auf dem Tageslichtprojektor wird offensichtlich nicht mehr vertrieben. Bei Bedarf kann man sich mit Kopien einer Sternkarte, die auf Folien erstellt wurden, behelfen.

Hinweise zu Bildserien und Filmen

Filme zu Astronomie-Themen sind häufig noch auf Video, in vielen Fällen aber schon auf DVD erhältlich. Meist sind diese Filme nicht mit dem notwendigen Recht zur nichtgewerblichen öffentlichen Vorführung ausgestattet und daher für den Unterricht nicht zulässig. Nebenbei sei erwähnt, dass die Medien der FWU mit diesem Recht versehen sind.

Die ESO und die NASA stellen gerade für den Ausbildungsbereich umfangreiches Film- und Bildmaterial zur Verfügung. Die angeführten Nutzungsbedingungen sollten beachtet werden.

Die früher üblichen Diaserien sind kaum mehr im Angebot und auch nur teilweise aktuell.

Software

[M6]	Stellarium	CD sehr empfehlenswertes Freeware-Planetarium, siehe www.stellarium.org/de
[M7]	Cartes du Ciel	Freeware-Programm zur Erstellung von Sternkarten, siehe www.astrosurf.com/astro/c/index.html
[M8]	Redshift	umfangreiches Planetariums- und vor allem Multimediaprogramm, siehe www.redshift.de
[M9]	Skyplot	umfangreiches Astronomieprogramm, siehe www.skyplot.de

Internetseiten

Mit den Internetseiten verhält es sich ähnlich wie mit der Literatur, das Angebot ist umfangreich und hinsichtlich des Niveaus sehr unterschiedlich. Die folgende Auswahl basiert wieder auf Empfehlungen von Kolleginnen und Kollegen.

Alle genannten Seiten wurden einer sorgfältigen Kontrolle unterzogen und enthielten keinerlei illegale Inhalte jeglicher Art (Stand Juli 2008). Trotzdem erklären die Autoren und das ISB ausdrücklich, dass eine Haftung für die aktuellen und künftigen Inhalte externer Links nicht übernommen werden kann. Die Verantwortung dafür liegt ausschließlich bei den Betreibern.

[1]	http://abenteuer-universum.de	umfangreiche Informationen
[2]	www.atlasoftheuniverse.com	hilfreiche graphische Darstellungen
[3]	www.astrolabium.net	deutsche Version der aktuellen NASA-Berichte
[4]	www.astronews.com/news/index.shtml	Informationen zu Neuigkeiten
[5]	www.astronomie.de	umfangreiche Informationen
[6]	www.astronomie.de/gad	Übersicht zu Volkssternwarten usw.
[7]	http://astro.uchicago.edu/cosmos	z. T. tolle Videos, Lizenzbedingungen beachten
[8]	http://antwpr.gsfc.nasa.gov/apod	jeden Tag ein anderes Astro-Bild mit Erläuterungen
[9]	http://chandra.harvard.edu	zahlreiche Informationen und Bilder
[10]	www.cv.nrao.edu/fits/www/yp_pictures.html	Links zu Fotos, Instituten, Observatorien
[11]	www.esa.int/esaCP/Germany.html	Startseite der European Space Agency
[12]	www.eso.org	Startseite der Europäischen Südsternwarte
[13]	http://hubblesite.org	Startseite Hubble-Teleskop
[14]	www.kis.uni-freiburg.de	Startseite des Kiepenheuer-Instituts (Sonnenphysik)
[15]	www.nasa.gov	Startseite der NASA
[16]	www.nasaimages.org	aktuelle, sehr gute Bilder
[17]	http://science.nasa.gov	aktuelle Berichte der NASA
[18]	http://sohowww.nascom.nasa.gov	unter anderem Bilder von der Sonne, Bildarchiv
[19]	www.vds-astro.de	Seite der Vereinigung deutscher Sternfreunde e. V.

-
- | | | |
|------|---|---|
| [20] | http://de.wikipedia.org/wiki/Portal:Astronomie | hier immer interessant: „Aktuelles“ |
| [21] | www.wissenschaft-schulen.de | Unterrichtsmaterialien von „Sterne und Weltraum“
sowie „Astronomie heute“ für den Download |
-