

Die Suche nach verborgenen Sternen

In Bezug zu den SuW-Beiträgen „VISTA entdeckt 96 Sternhaufen“ (Nachricht in 12/2011, S. 14) und „Offene Sternhaufen“ (Welt der Wissenschaft, 8/2011, S. 30)

Cecilia Scorza

Die meisten Sterne unseres Milchstraßensystems, die mehr als eine halbe Sonnenmasse besitzen, entstehen nicht einzeln, sondern in Gruppen - in den so genannten Sternhaufen. In unserer Galaxis kennen wir zwei Typen von Sternhaufen: Kugelsternhaufen und offenen Sternhaufen. Da die einzelnen Sterne der Haufen etwa gleich entfernt von uns und gleichzeitig entstanden sind, stellen die Haufen ausgezeichnete Labore zur Erforschung der Sternentwicklung dar.

Die unterschiedlichen Sternpopulationen und Verteilungen dieser zwei Sternhaufentypen in der Galaxis zeigen, dass sie aus verschiedenen Epochen stammen. Vor kurzem wurden anhand der Infrarotaufnahmen des VISTA-Teleskops (ESO) viele neue junge offene Sternhaufen entdeckt, ein weiteren Hinweis dafür, dass diese wichtige Bausteine der Scheibe unseres Milchstraßensystems sind.

Die folgenden WIS-Materialien sind so aufgebaut, dass Schüler über Fragestellungen eingeladen werden, den Schritten der Forscher zu folgen und aktiv mitzumachen. Anhand von Aktivitäten (in blauen Kästen) können die Schüler ihre neu erworbenen Kenntnisse anwenden, Fragen in Gruppen diskutieren und gemeinsam die Rolle der Sternhaufen in der Entwicklung unserer Galaxis nachvollziehen.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sterne, Astropraxis	Sternhaufen-Klassifikation, Farbe und Leuchtkraft der Sterne, Sternentwicklung, H-R-Diagramm, Infrarotastronomie
Fächer- verknüpfung	Astro-Ph, Astro-Ch	Leuchtkraft, Leistung, Infrarotexperimente, Entstehung der Elemente
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Unterrichtsmittel, WIS-Kategorien	Wissenschaftliche Fragestellungen folgen, Objekte klassifizieren und zuordnen, Anwendung von Theorien, Zusammenhänge feststellen und eigene Hypothesen formulieren



Abbildung 1: Mit dem Infrarot-Teleskops VISTA am Paranal-Observatorium der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile konnte die Astronomin Jura Borissova zusammen mit Kollegen 96 neue offene Sternhaufen entdecken. Die kleinen Gruppen von Sternen waren bislang in Staubwolken unserer Galaxis verborgen. Sie können nun zum ersten Mal beobachtet werden.

1. Sternhaufen auf der Spur

Wenn wir gegen 21:00 Uhr in einer klaren Nacht den Herbsthimmel betrachten, können wir im Osten das markante Sternbild Stier mit seinem hellen Stern Aldebaran sehen. Etwas nordwestlich davon sticht eine Gruppe blauer Sterne in unsere Augen - die Plejaden. Solche schöne Sternhaufen sind nicht selten am Himmel und können mit einem Fernglas gut gesichtet werden.

Die Sterne eines Haufens gehören meistens zusammen, d. h., dass sie durch die Anziehungskraft ihrer Sterne gebunden sind. Da sie am selben Ort und zur selben Zeit entstanden sind, haben alle Sterne dasselbe Alter. Dies macht sie sehr geeignet für die Erforschung der Sternentwicklung, weil ihre Messdaten auf Grund ihrer ähnlichen Entfernung genauer sind als von einzelnen Sternen, die unterschiedlich weit entfernt von der Erde sind. Heute sind die Astronomen der Meinung, dass die Sternhaufen wichtige Bausteine des Milchstraßensystems sind.

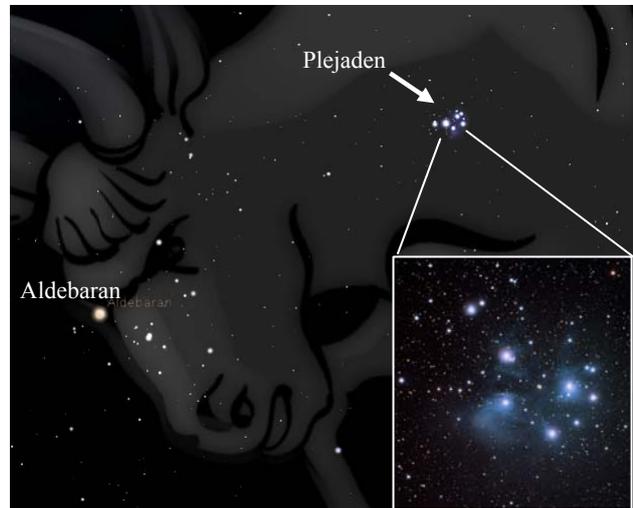


Abbildung 2: Das Sternbild Stier mit den Plejaden.

In der Astronomie wird zwischen zwei Typen von Sternhaufen unterschieden:

- **Kugelsternhaufen:** Sie besitzen bis zu einige hunderttausend Sterne, die sehr dicht zueinander platziert sind und zusammen eine deutlich sichtbare Kugel von Sternen bilden.
- **Offene Sternhaufen:** Sie besitzen viel weniger Sterne, und diese sind loser verteilt.

Viele Sternhaufen und andere astronomische Objekte wurden im 18. Jahrhundert vom französischen Astronomen Charles Messier in einem nach ihm benannten Katalog aufgelistet. Zweck des Katalogs war es, anderen Astronomen zu helfen, fixe Objekte am Himmel (wie Sternhaufen, Galaxien und Gasnebel) von beweglichen Objekten (wie Kometen) zu unterscheiden. Seine 110 katalogisierten Objekte tragen deshalb die Bezeichnung „M“ (von Messier) vor der zugeordneten Zahl.

Aktivität 1: Sternhaufen klassifizieren

Klassifiziere, ausgehend von zwei Beispielen, welche den Kugelsternhaufen M 80 und den offenen Sternhaufen M 67 zeigen, die Sternhaufen des Arbeitsblatts 1.



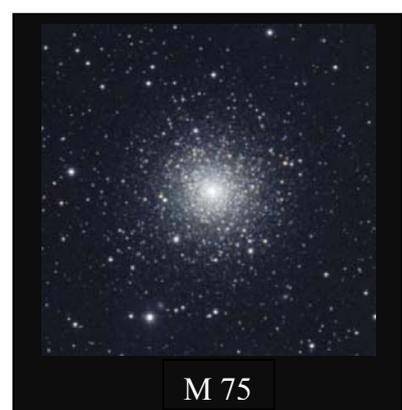
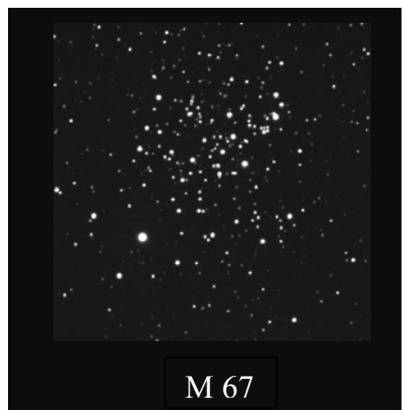
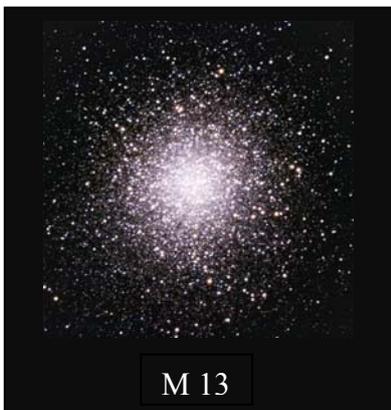
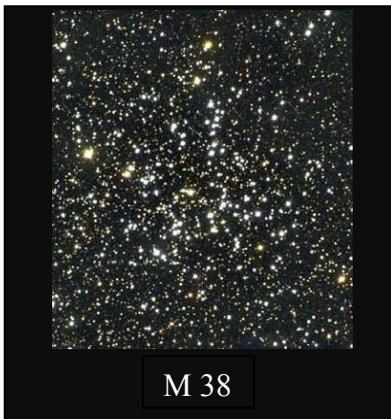
M 80 (Kugelsternhaufen)



M 67 (offener Sternhaufen)



Aktivität 1: (Arbeitsblatt 1) Klassifikation von Sternhaufen



Name	Typ
M 75	
M 80	
M 15	
M 13	
M 92	

Name	Typ
M 38	
M 37	
M 103	
M 67	
M 45/ Plejaden	



2. Die Eigenschaften und Zustandsgrößen der Sterne

2.1 Die Farbe der Sterne

Wenn wir die zentralen Sterne des Sternhaufens M 103 (siehe rechts) genauer betrachten, können wir feststellen, dass die Sterne unterschiedliche Farben und unterschiedliche Helligkeiten haben.

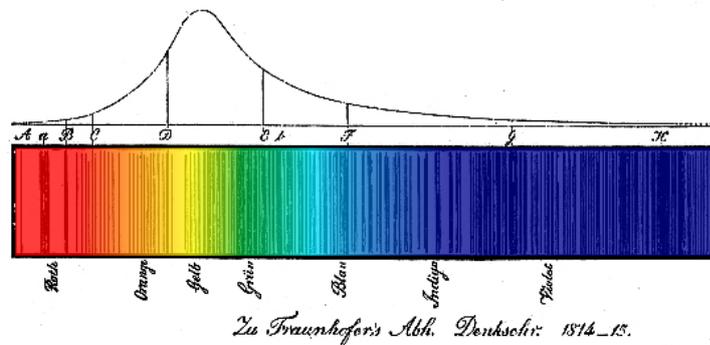
Warum Sterne unterschiedliche Farbe haben, hängt von ihrer Temperatur ab. Zerlegt man das Licht eines Sterns mit einem Prisma, dann können die Farben, aus denen sich das Sternenlicht zusammensetzt, analysiert werden.



In Abb. 9 ist das Spektrum der Sonne zu sehen. Jeder Farbe entspricht eine Wellenlänge λ . Die durchgehende Linie oberhalb des Spektrums gibt an, wie viel Energie bei den einzelnen Wellenlängen abgestrahlt wird. Man nennt sie die „spektrale Energieverteilung“. Aus der Abbildung folgt, dass die Sonne die meiste Energie im Wellenlängenbereich des grünen-gelben Lichts aussendet. Weil sich alle Farben bei dieser Energieverteilung in unseren Augen mischen, sehen wir die Sonne gelb!



Abbildung 9



Betrachten wir nun genauer die Sterne des Wintersternbilds Orion (Abb. 10b). Wir können sofort feststellen, dass nicht alle Sterne gelb wie die Sonne sind. Manche sind bläulich, andere rötlich (wie auch bei den Sternhaufen in Aktivität 1). In Abb. 10a ist die spektrale Energieverteilung von drei unterschiedlichen Sternen dargestellt: Von Betelgeuse, der Sonne und von Rigel. Obwohl sich die spektralen Energieverteilungen der Sterne prinzipiell ähneln, senden sehr heiße Sterne wie Rigel mehr Energie im blauen Bereich des Spektrums aus. Sie erscheinen daher bläulich. Kühlere Sterne strahlen hingegen die meiste Energie im roten Wellenlängenbereich ab und sehen rötlich aus, wie Betelgeuse.

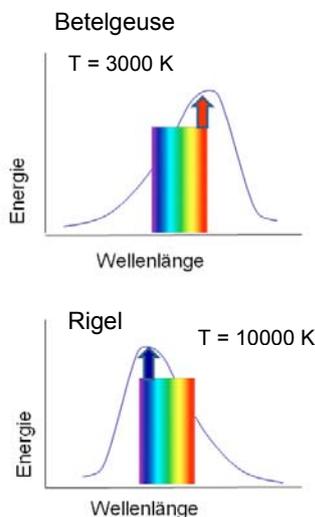


Abbildung 10a

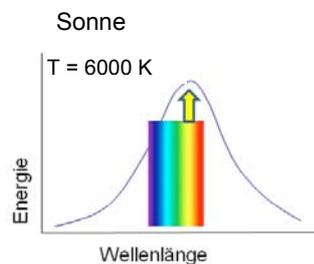


Abbildung 10b



Zwischen der Oberflächentemperatur T eines Sterns und seiner Farbe gibt es folglich einen physikalischen Zusammenhang. Die Messungen der Astronomen besagen, dass die Oberflächentemperaturen der Sterne im Bereich zwischen 2000 K (rote Sterne) und 30.000 K (blaue Sterne) liegen. Sterne, die der Sonne ähnlich sind (gelbe Sterne), haben Oberflächentemperaturen von etwa 6000 Kelvin.

Die Astronomen ordnen die Sterne anhand ihrer Oberflächentemperaturen in verschiedene Spektralklassen (man denke an Schulklassen mit verschiedenen Merkmalen) ein, die sie mit den folgenden Buchstaben bezeichnen: O, B, A, F, G, K und M. In Tab. 1 sind die Temperaturbereiche und Sternfarben aufgelistet, die den jeweiligen Sterntypen entsprechen.

Spektralklasse	Oberflächentemperatur in K	Sternfarbe	
O	30000 – 60000	blau	
B	10000 – 30000	blauweiß	
A	7500 – 10000	weiß	
F	6000 – 7500	gelbweiß	
G	5000 – 6000	gelb	
K	3500 – 5000	gelborange	
M	< 3500	rot	

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Spektralklassen, Oberflächentemperaturen und Farben der Sterne.

Die Reihenfolge der Spektralklassen kann man sich mit Hilfe eines Merkspruchs sehr leicht einprägen:

„Oh Be A Fine Girl, Kiss Me“
oder
„Oh Be A Fine Guy, Kiss Me“

Aktivität 2: Sterne zuordnen, Farbe und Spektralklasse bestimmen

Suche anhand einer Sternkarte (siehe separates Arbeitsblatt) das Sternbild, zu dem die hier genannten bekannten Sterne gehören. In welcher Jahreszeit sind sie sichtbar?

Finde mit Hilfe der Tabelle heraus, welche Farbe sie haben und zu welcher Spektralklasse sie gehören.

Stern	Sternbild / Jahreszeit	Temperatur [K]	Farbe	Spektral-Klasse
Capella		5150		
Aldebaran		3800		
Rigel		11000		
Sirius		10000		
Procyon		6800		
Pollux		4200		
Betelgeuse		3200		
Arcturus		4100		
Spica		22400		
Regulus		13000		
Vega		9900		
Altair		7500		
Deneb		8400		
Ross 248		3000		
Antares		3340		
Polaris		6100		

2.2. Die Leuchtkraft der Sterne

Die Sterne der Sternhaufen der Aktivität 1 und andere Sterne unterscheiden sich nicht nur in ihrer Farbe, sondern auch in ihrer Helligkeit. Sterne strahlen unterschiedlich stark am Nachthimmel, weil sie unterschiedlich hell sind oder/und weil sie unterschiedlich weit von uns entfernt sind. Um die Sterne genau charakterisieren zu können, müssen die Astronomen ihre „wahre“ *intrinsische Leuchtkraft* L bestimmen.

Die Leuchtkraft L einer Strahlungsquelle, die ihre Energie gleichmäßig in alle Richtungen abgibt (ein Stern), ergibt sich aus:

$$(1) \quad L = f \cdot A.$$

Hier bezeichnet f den Energiefluss (Energie pro Zeit und Fläche A) in der Entfernung r von dem Stern, und wird in Watt pro Quadratmeter angegeben. Da die Strahlung eines Sterns in alle Richtungen gleich ist, können wir annehmen, dass sich die Gesamtenergie des Sterns auf die Oberfläche A einer imaginären Kugel um den Stern mit dem Radius r ($A = 4\pi r^2$) verteilt (siehe Abb. 11):

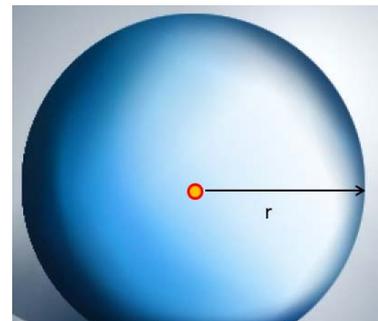


Abbildung 11

$$(2) \quad L = f \cdot 4\pi r^2.$$

Um die Leuchtkraft eines Sterns zu bestimmen, müssen wir also nur seinen Energiefluss f , der bei uns auf der Erde ankommt, und seine Entfernung r * messen. (Wegen der Energieabsorption innerhalb der Erdatmosphäre wird der Energiefluss f mit Detektoren gemessen, die sich oberhalb der Atmosphäre befinden.)

Aktivität 3: Berechnung der Leuchtkraft der Sonne

Die Energie f , die von der Sonne abgestrahlt wird und außerhalb der Erdatmosphäre pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit senkrecht ankommt (die sogenannte Solarkonstante) beträgt:

$$f = 1,36 \cdot 10^3 \text{ W / m}^2$$

Der Abstand der Erde von der Sonne beträgt $r = 1 \text{ AU} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ (AE ist die Entfernung Erde-Sonne, die so genannte astronomische Einheit).

Berechne die Leuchtkraft L_{\odot} der Sonne.

Es ist hilfreich, die Leuchtkraft L eines Sterns mit der Leuchtkraft L_{\odot} unserer Sonne zu vergleichen, da diese der Stern ist, den wir am besten kennen. Durch die Übungsaufgabe haben wir gesehen, dass die Sonne mit einer Leuchtkraft von $3,84 \times 10^{26}$ Watt strahlt. In der Astronomie verwendet man für diese Leistung die Bezeichnung eine „Sonnenleuchtkraft“ ($1 L_{\odot}$) und benutzt sie als Referenz für die Leuchtkräfte anderer Sterne. Ein Stern, der im Vergleich zur Sonne nur mit der halben Leistung strahlt, hat demzufolge die Leuchtkraft von $0,5 L_{\odot}$.

* Zur Sternentfernungen siehe WIS-Material „Doppelsterne – Versuchsobjekte für das Auge, die Optik, das Weltbild und die Schwere“ von Olaf Fischer

2.3 Der Zusammenhang zwischen Leuchtkraft, Temperatur und Radius

Die Leuchtkraft L eines Sterns hängt mit seinem Radius R und seiner Oberflächentemperatur T folgendermaßen zusammen:

$$(3) \quad L = 4\pi\sigma R^2 T^4$$

Diesen Ausdruck kann man aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz herleiten:

$$(4) \quad f \sim T^4$$

Dieses besagt, dass die Menge an Wärmeenergie (f), die ein Schwarzer Körper von seiner Oberfläche abgestrahlt, mit der vierten Potenz der Temperatur T zunimmt. Ein Körper A beispielsweise, der doppelt so heiß wie ein Körper B ist, strahlt im Vergleich zu Körper B also die 16-fache Menge an Wärmeenergie ab. In erster Näherung kann man die Sterne als Schwarze Körper betrachten. Der Ausdruck $4\pi R^2$ in Gleichung (3) entspricht der Oberfläche eines Sterns, also einer Kugel, mit dem Radius R .

Hat man die Leuchtkraft L eines Sterns gemäß Gleichung (2) bestimmt und seine Oberflächentemperatur T anhand seiner Farbe abgeleitet, kann man mit Hilfe von Gleichung (3) den Sternradius R berechnen. Durch einen Vergleich der Sternparameter mit den Parametern der Sonne erhalten wir aus Gleichung (3):

$$(5) \quad \frac{L}{L_{sun}} = \left(\frac{R}{R_{sun}}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{sun}}\right)^4 \quad \text{und}$$

$$(6) \quad \left(\frac{R}{R_{sun}}\right)^2 = \frac{L}{L_{sun}} \cdot \left(\frac{T}{T_{sun}}\right)^{-4}.$$

Aktivität 4: Die Sonne und den Stern Kapella vergleichen

Betrachte Kapella, den hellsten Stern des Sternbilds Fuhrmann. Mit 5150 K hat er näherungsweise die gleiche Temperatur wie die Sonne (5840 K), ist aber 141-mal heller als diese. Aus Gleichung (5) wissen wir, wie die Leuchtkraft L vom Sternradius R und der Oberflächentemperatur T abhängt. Könntest Du davon ausgehend die größere Leuchtkraft von Kapella erklären?

Capella: $T(\text{Kapella}) = 5150$ Kelvin

Sonne: $T_{\odot} = 5840$ Kelvin

$L(\text{Kapella})/L_{\odot} = 141$

3. Die Entwicklung der Sterne

Jahrhunderte lang haben Astronomen über das Leben der Sterne nachgedacht. Scheinen die Sterne ewig oder sterben sie? Wie entstehen sie und wie verändern sie sich nach ihrer Geburt im Laufe der Zeit?

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelten einige Physiker die Theorie der Kernfusion. Sie erkannten, dass dieser Mechanismus genügend Energie liefert, um die lange anhaltende Leuchtkraft der Sterne zu erklären. Sie erkannten auch, dass Sterne, denen das Material für die Fusion ausgeht, ausbrennen und sterben. Aber was geschieht mit Sternen während ihrer Lebenszeit?

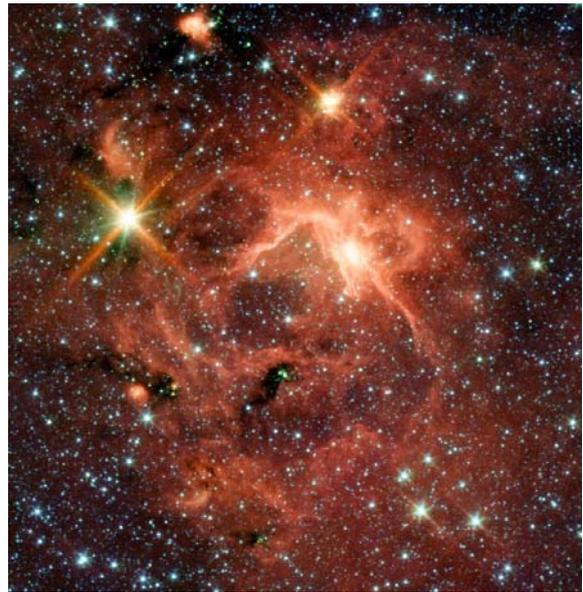


Abbildung 12: Ein massereicher Stern und sein Geburtsort (NASA, Spitzer-Teleskop, Infrarotaufnahme).

Der erste Hinweis zur Beantwortung dieser Frage kam von zwei Astronomen, die auf zwei verschiedenen Kontinenten arbeiteten. Der Däne Ejnar Hertzsprung und der Amerikaner Henry Norris Russell entdeckten unabhängig voneinander, dass **die Leuchtkraft L** eines Sterns mit seiner **Oberflächentemperatur T** zusammenhängt. Das war ein Hinweis darauf, dass zwischen diesen beiden Parametern ein physikalischer Zusammenhang besteht. *Es stellte sich heraus, dass hinter diesem Zusammenhang die Sternentwicklung steckt!*

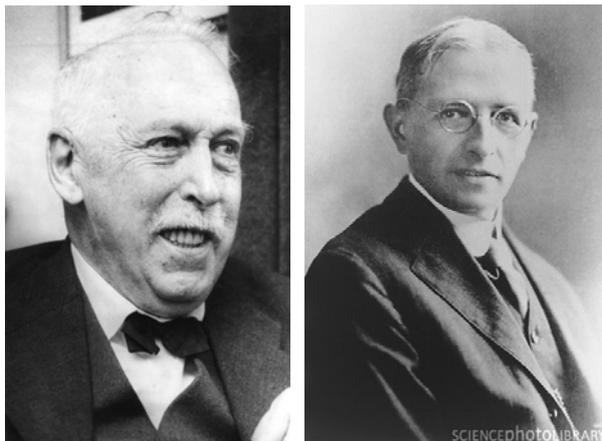


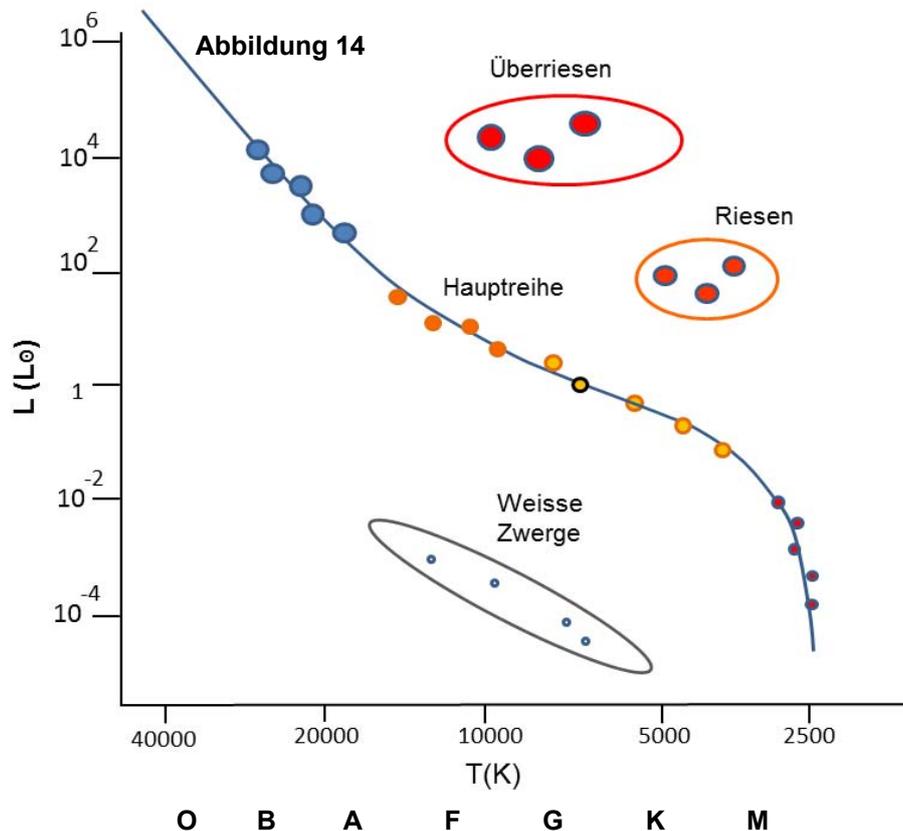
Abbildung 13: Ejnar Hertzsprung (links) und Henry Norris Russell (rechts).

Bis heute hat sich das sogenannte Hertzsprung-Russell-Diagramm (HR-Diagramm oder kurz HRD) als Rosetta-Stein der Stellarastronomie erwiesen. Seit dieser Entdeckung verstehen wir, welche Vorgänge das Leben der Sterne bestimmen, wie sie sich entwickeln und wie sie sterben.

Da wir uns mit den Sternengrößen bereits vertraut gemacht haben, können wir uns nun der Sternentwicklung widmen.

3.1 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)

Als Hertzsprung und Russell die Leuchtkraft L und die Oberflächentemperatur T von sonnennahen Sternen gegeneinander auftrugen, stellten sie fest, dass die Sterne nicht zufällig über das Diagramm verteilt waren. Sie sind vielmehr auf bestimmte Gebiete konzentriert. Die meisten Sterne liegen in dem Bereich, den die Astronomen entsprechend „Hauptreihe“ nennen. Auch die Sonne befindet sich dort (gelb-schwarzer Punkt).



Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass es drei Arten von Sternen gibt, die sich jeweils in einer speziellen Region aufhalten:

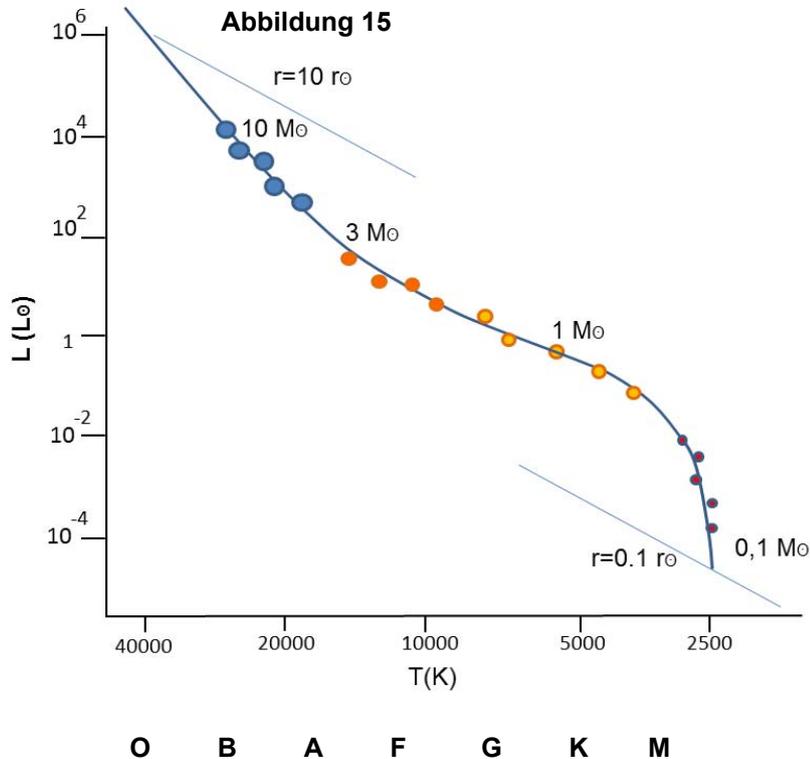
- 1) Die **Hauptreihe** umfasst extrem leuchtkräftige, heiße Sterne (O, B) bis hin zu kühleren, kleineren und weniger leuchtkräftigen Sternen (M). Letztere sind signifikant leuchtschwächer als die Sonne.
- 2) **Rote Riesen und Überriesen** sind sehr leuchtkräftige Sterne, die jedoch nur relativ niedrige Oberflächentemperaturen (rote Farbe) aufweisen. Zu dieser Gruppe zählt auch Beteigeuze, einer der helleren Sterne in der Milchstraße, der sich im Sternbild Orion befindet.
- 3) **Weißer Zwerge** sind zwar sehr heiß, haben aber trotzdem nur eine geringe Leuchtkraft, weil sie sehr klein sind.

Durch theoretische Überlegungen erkannten die Astronomen, dass *die verschiedenen Bereiche im H-R-Diagramm wichtige Informationen zum Lebenszyklus der Sterne enthalten*. Zu sehen sind sowohl junge heiße als auch alte kühle Sterne und solche, die ihr Leben beendet und eine leere Hülle hinterlassen haben. Durch die Untersuchung einer Vielzahl von Sternen mit verschiedenem Alter ist es den Astronomen gelungen, ein komplettes Bild der Sternentwicklung zu erarbeiten.

Die Hauptreihe ist der Ort im H-R-Diagramm, an dem die Sterne 90 % ihrer Lebenszeit verbringen. *Während dieser langen Zeit verbrennen sie in ihren Kernen Wasserstoff zu Helium und befinden sich im hydrostatischen Gleichgewicht. Auch bleiben Oberflächentemperatur und Leuchtkraft etwa konstant.*

Die Masse bestimmt die Entwicklung!

Von allen charakteristischen Größen, die den Zustand eines Sterns bestimmen, erwies sich die **Masse M** als diejenige, die bestimmt, an welcher Stelle im HRD sich ein Stern befindet. In Abb. 15 ist die Verteilung der Sternmassen entlang der Hauptreihe dargestellt.



Aus diesem Diagramm kann man folgendes ableiten:

1. Die Massen der Sterne nehmen entlang der Hauptreihe ab (von links nach rechts).
2. Die massereichsten Sterne besitzen die höchsten Leuchtkräfte ($L \sim M^3$) und die größten Radien ($L \sim R^2$).

Die Masse eines Sterns bestimmt nicht nur den Platz, den er im HRD einnimmt, sondern auch seinen Entwicklungsweg und wie er stirbt. Massearme Sterne wie die Sonne leben sehr lange. Sie verbrennen ihren Wasserstoff sehr langsam und verweilen ungefähr 9 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe. Im Gegensatz dazu verbrennen massereiche Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen ihren Wasserstoffvorrat sehr schnell und bleiben folglich nur ein paar Millionen Jahre lang auf der Hauptreihe. Die Astronomen unterscheiden daher entsprechend der Masse, zwei unterschiedliche Entwicklungswege der Sterne.

Entwicklungsweg 1: sonnenähnliche und massearme Sterne Von Hauptreihensternen zu Weißen Zwergen

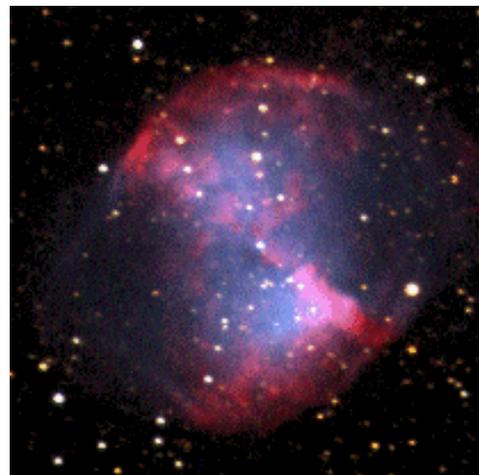
Nach Milliarden von Jahren verlässt ein Stern mit einer ursprünglichen Masse von weniger als 5 Sonnenmassen die Hauptreihe, wird zum Roten Riesen und schließlich zum Weißen Zwerg. Die Vorgänge, die zwischen diesen Stadien ablaufen, sind folgende:

Wenn der Wasserstoffvorrat im Kern erschöpft ist, verringert sich der Gasdruck. Der Stern kann die Wirkung der Schwerkraft nicht mehr ausgleichen und beginnt zu kontrahieren. Dadurch wird der Kern kleiner und dichter, die Temperatur erhöht sich und im Kern beginnt dann Helium zu fusionieren, wobei Kohlenstoff und Sauerstoff entstehen. Währenddessen beginnt Wasserstoff in einer dünnen Schale um den Kern herum zu fusionieren. Da sich die Temperatur im Sterninneren erhöht hat, wird der Stern um etwa das 1000- bis 10.000-fache heller. Infolge zunehmender Temperatur und entsprechend wachsendem Gasdruck, dehnt sich der Stern aus (der Radius wird grösser), und der Stern kühlt sich an der Oberfläche ab. Die Oberflächentemperatur dieser ausgedehnten Hülle verringert sich auf etwa 3500 Kelvin und lässt den Stern rot erscheinen. *Ein Roter Riese ist entstanden!*

Aktivität 5: Wie groß wird die Sonne in der Rote-Riesen-Phase werden?

In 4,5 Milliarden Jahren wird die Sonne zum Roten Riesen werden. Ihre äußere Hülle wird sich dabei so stark ausdehnen, dass der Radius der Sonne (1,5 Mio. km) etwa 147-fach größer werden wird. Welche Planeten des Sonnensystems werden dann in die Sonne verglühen?

Während dieser Phase dehnen sich die äußeren Schichten des Sterns aus und ziehen sich wieder zusammen. Der Stern pulsiert mit Perioden, die einige Tage bis über ein Jahr dauern können und wird zu einem **veränderlichen Stern**. Aufgrund ihrer variierenden Leuchtkräfte kann man derartige Sterne auch in großen Entfernungen nachweisen. Nach dieser Phase der Instabilität, wirft der Stern seine äußeren Schichten ab - ein **Planetarischer Nebel** (siehe Bild rechts) erscheint. Nun endet die Kernfusionen, der Kern fällt in sich zusammen und alles, was von dem ursprünglichen Stern übrig bleibt, ist ein inaktiver Kern, der sich zu **einem Weißen Zwerg** entwickelt.



Entwicklungsweg 2: massereiche Sterne Von Hauptreihensternen zu Neutronensternen und Schwarzen Löchern

Beträgt die ursprüngliche Masse eines Sterns etwa 10 Sonnenmassen, läuft die gesamte Entwicklung viel schneller ab. Wenn der Stern die Hauptreihe verlässt, wird er ein Überriese, und die Bildung schwerer Elemente (Silizium, Schwefel, Kalzium) findet statt. Dabei erhöht sich die Temperatur im Kern auf ungefähr 3 Milliarden Kelvin! Im Kern des Sterns verschmelzen immer schwerere Elemente, bis der Kernbereich komplett aus Eisen besteht. Hier hält der Verschmelzungsprozess an, weil Eisen sehr stabil ist und nicht mehr weiter zu schwereren Elementen fusionieren kann (dazu wäre Zufuhr von Energie nötig). Ohne Kernreaktionen, die die Schwerkraft ausgleichen, fällt der Kern in sich zusammen. Dies geschieht mit unglaublicher Geschwindigkeit. Die einfallenden Schichten prallen gegen den Kern, was zu einer gewaltigen Explosion führt: eine **Supernova**.

Eine Supernova ist eines der hellsten Phänomene im Universum. Während einer derartigen Explosion strahlt ein Stern mehr Energie aus als alle 200 Milliarden Sterne einer Galaxie zusammen abstrahlen! Bei der Supernova-Explosion wird ein großer Teil des Sternmaterials ins All geschleudert. Der implodierte Kern besitzt nun eine Dichte von etwa 1 000 000 000 000 Tonnen pro cm^3 und einen Durchmesser von nur wenigen Kilometern. In diesem Kern werden die Atome so stark von der Schwerkraft komprimiert, dass die Elektronen der Atomhüllen in den Atomkerne hineinfallen, so dass die Protonen zu Neutronen werden: ein **Neutronenstern** entsteht.

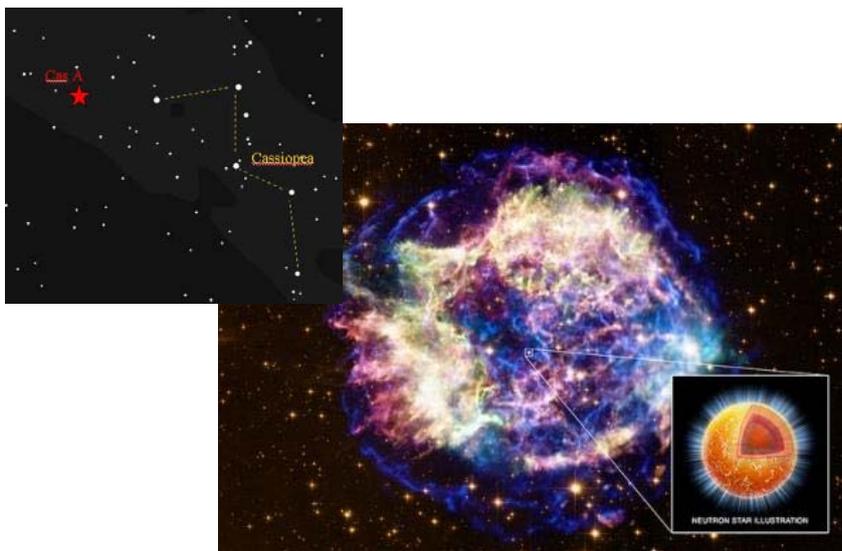


Abbildung 16: Im Sternbild Cassiopeia explodierte vor 330 Jahren ein riesiger Stern. Aus der Supernova-Explosion entstand ein Neutronenstern. (Abb. 16 links: Das Sternbild Cassiopeia mit der markierten Stelle der Supernova. Rechts: Aufnahmen der Reste der Supernova mit Darstellung des Neutronensterns.

Wenn die ursprüngliche Sternmasse sehr groß ist (ab 30 Sonnenmassen), *nimmt der Radius des Neutronensterns weiter ab*. Schließlich kollabiert der Stern zu einem Schwarzen Loch, das eine unendliche Dichte und Anziehungskraft besitzt. Der ganze Prozess vom Zusammenstürzen des Sternrests bis zur Entstehung eines **Schwarzen Lochs** geht sehr schnell vor sich, innerhalb von Sekunden! Nicht einmal das Licht kann einem Schwarzen Loch entgehen.

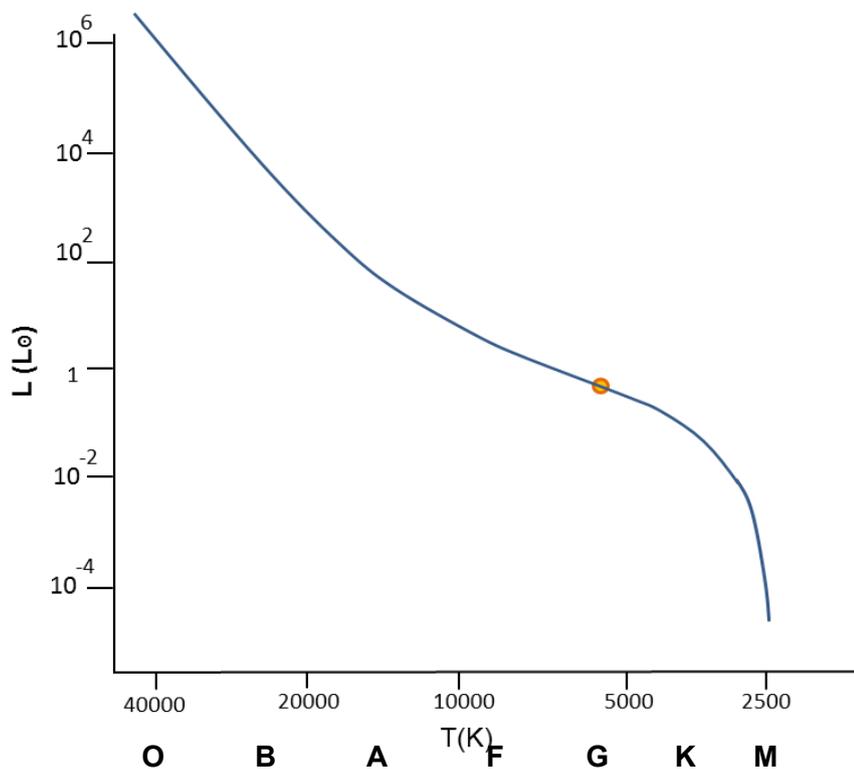
Aktivität 6: Entwicklungswege zusammen puzzeln

Versuche anhand der Bilder des Arbeitsblattes 6 (im Anhang) die Entwicklungsstadien der Sterne von: (a) 1 Sonnenmasse, (b) 10 Sonnenmassen und (c) 30 Sonnenmassen zu rekonstruieren.

Aktivität 7: Übungen mit bekannten Sternen im H-R-Diagramm

- (a) Trage die Leuchtkraft L und die Temperatur T der Sterne aus der unten stehenden Tabelle in das H-R-Diagramm ein. Bitte beachte Folgendes: Sirius ist ein Doppelsternsystem, das aus Sirius A und Sirius B besteht..
- (b) Diskutiere und beantworte die Fragen der nächsten Seite.

Stern	Leuchtkraft in L_{\odot}	Temperatur in K
Capella	141	5150
Aldebaran	156	3800
Rigel	40000	11000
Sirius A	22	10000
Sirius B	0.0025	25000
Procyon	7500	6800
Pollux	32	4200
Betelgeuse	14454	3200
Arcturus	210	4100
Spica	13400	22400
Regulus	138	13000
Vega	52	9900
Altair	11	7500
Deneb	250000	8400
Ross 248	0.0004	3000
Antares	9120	3340
Polaris	5500	6100
Alpha Centauri	1,5	5800



Fragen: diskutieren und beantworten

1. Welcher der Sterne ist in Bezug auf seinen Lebenszyklus am ältesten?
2. Welche dieser Sterne verwenden im Kern gerade Wasserstoff als Brennstoff?
3. Welche dieser Sterne verwenden im Kern gerade Helium als Brennstoff?
4. Welcher dieser Sterne ist dem Tode am nächsten?
5. Welcher dieser Sterne hat die größte Leuchtkraft?
6. Warum strahlen die leuchtkräftigsten Sterne am hellsten - aufgrund ihrer Größe (Radius) oder aufgrund ihrer Oberflächentemperatur?
7. Welcher dieser Sterne besitzt die geringste Leuchtkraft?
8. Der Stern mit der geringsten Leuchtkraft ist am schwächsten, wegen seiner Oberflächentemperatur oder wegen seiner Größe?
9. Welcher dieser Sterne hat die höchste Oberflächentemperatur?
10. Hauptreihensterne entwickeln sich zu Roten Riesen, wenn sie welche Elemente in ihren Kernen aufgebraucht haben: Helium, Kohlenstoff oder Wasserstoff?
11. Werden sich die drei Hauptreihensterne jemals zu Weißen Zwergen entwickeln?
12. War der Stern Sirius B jemals ein Hauptreihenstern?
13. Welche Phase wird Wega als nächste erreichen: Roter Riese, Hauptreihenstern, Weißer Zwerg?