

# ASTRONOMISCHE ÜBUNGSREIHE DER ESA/ESO

Astronomische Schülerübungen basierend auf  
Beobachtungsdaten des NASA/ESA  
Hubble Weltraumteleskops  
und der ESO Teleskope.



Übung 4



**Messen der Distanz und des Alters eines Kugelsternhaufens**  
Basierend auf Aufnahmen des ESO Very Large Telescope





# Inhaltsverzeichnis

## Astronomische Übungsreihe der ESA/ESO Teil 4

### Vorwort

- Vorwort ..... Seite 2

### Einleitung

- Sterne ..... Seite 3
- Wasserstoffbrennen ..... Seite 3
- Sternhaufen ..... Seite 3
- Kugelsternhaufen ..... Seite 4
- Der Kugelsternhaufen M12 ..... Seite 6
- Das Hertzsprung-Russel Diagramm ..... Seite 6
- Sternentwicklung im H-R-Diagramm ..... Seite 7
- B-V Farbindex ..... Seite 8
- Das H-R Diagramm als Schlüssel zu  
einem Sternhaufen ..... Seite 8

### Aufgaben

- Beobachtungen, Datenreduktion und  
Datenanalyse ..... Seite 9
- Hinweise zur Analyse der Aufnahmen ..... Seite 9
- Aufgabe 1 B-Band Training ..... Seite 9
- Aufgabe 2 B-Band Eichung ..... Seite 9
- Aufgabe 3 B-Band Helligkeiten ..... Seite 9
- Aufgabe 4 V-Band Training ..... Seite 10
- Aufgabe 5 V-Band Eichung ..... Seite 10
- Aufgabe 6 V-Band Helligkeiten ..... Seite 10
- Aufgabe 7 Farbindex ..... Seite 10
- Aufgabe 8 Oberflächentemperatur ..... Seite 10
- Aufgabe 9 H-R Diagramm ..... Seite 10
- Aufgabe 10 Hauptreihen Anpassung ..... Seite 10
- Aufgabe 11 Die Entfernung von M12 ..... Seite 10
- Aufgabe 12 Korrektur der Extinktion ..... Seite 10
- Aufgabe 13 ..... Seite 16
- Die Entwicklung eines Kugelsternhaufens ..... Seite 16
- Aufgabe 14 ..... Seite 16
- Aufgabe 15 ..... Seite 16
- Aufgabe 16 ..... Seite 16

### Weitere Aufgaben

- Aufgabe 17 ..... Seite 17
- Aufgabe 18 ..... Seite 18

### Weiterführende Literatur

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen ..... Seite 19

### Für den Lehrer

- Für den Lehrer ..... Seite 21

## Vorwort

### Astronomische Übungsreihe der ESA/ESO Teil 4

# Messen der Distanz und des Alters eines Kugelsternhaufens

Astronomie ist eine leicht zugängliche und anschauliche Wissenschaft, welche ideal für die Verwendung im Schulunterricht ist. In den letzten Jahren haben das NASA/ESA Hubble Weltraumteleskop und die ESO Teleskope auf den Beobachtungsstationen La Silla und Paranal in Chile immer spektakulärere und tiefere Einblicke in das Universum geliefert. Hubble und die ESO Teleskope haben nicht nur faszinierende neue Bilder geliefert, sie sind gleichzeitig auch als Werkzeuge für Astronomen von unschätzbarem Wert. Die Teleskope haben hervorragende räumliche Auflösung/Winkelauflösung (Bildschärfe) und erlauben den Astronomen tiefer als je zuvor ins Universum zu blicken und dabei seit langem anstehende Fragen zu beantworten.

Obwohl die Analyse von solchen Beobachtungen im Detail oft wissenschaftlich sehr anspruchsvoll ist, können sie manchmal einfach genug sein, dass auch Oberstufenschüler die Möglichkeit haben, die Auswertung selbständig nachzuvollziehen.

Diese Übungsreihe wurde gemeinsam von der ESA (European Space Agency), dem europäischen Partner des Hubble Projekts, welche 15% der Beobachtungszeit am Hubble besitzen, und der ESO (European Southern Observatory, Europäische Südsternwarte) erstellt.



**Abbildung 1: Das ESO Very Large Telescope**

Das ESO Very Large Telescope (VLT) auf der Beobachtungsstation Paranal (Atacama, Chile) ist das größte und technisch fortschrittlichste optische Teleskop der Erde. Aufgrund seiner erstklassigen optischen Auflösung und der unübertroffenen Spiegelfläche kann das VLT sehr scharfe Bilder liefern und das Licht der lichtschwächsten und am weitest entfernten Objekte im Universum aufzeichnen.



## Einleitung

### Sterne

Ein Stern ist ein riesiger Ball aus selbst leuchtendem Gas, der durch physikalische Eigenschaften, wie Masse, Temperatur und Radius charakterisiert werden kann. Für die Astronomen ist darüber hinaus auch die Entfernung zur Erde von Interesse. Der nächste — und am besten erforschte — Stern ist natürlich unsere eigene Sonne.

### Wasserstoffbrennen

Das Licht, das von den meisten Sternen abgestrahlt wird, ist ein Nebenprodukt von thermonuklearen Fusionsprozessen im inneren Kern der Sterne. Ein normaler sonnenähnlicher Stern besteht aus etwa 74% Wasserstoff und 25% Helium. Das restliche 1% ist eine Mischung aus schwereren Elementen. Der häufigste Prozess einer Kernfusion in einem sonnenähnlichen Stern ist das ‚Wasserstoffbrennen‘, das Verschmelzen von 4 Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern. Abbildung 2 zeigt schematisch die Gesamtbilanz des Wasserstoffbrennens. Dieser Prozess läuft in mehreren Stufen ab. Im ersten Schritt verschmelzen zwei Protonen zu einem Deuteriumkern, einem schweren Isotop des Wasserstoff. Selbst im dichten Kern eines Sterns, wo die

Temperatur einige Millionen Grad beträgt, ist dies ein sehr unwahrscheinliches Ereignis. Dies ist der Grund weshalb sonnenähnliche Sterne nicht in einer wilden Kettenreaktion explodieren, sobald Kernfusion im Inneren beginnt, sondern über mehrere Milliarden Jahre in einem stabilen Gleichgewicht sind. Die Oberflächentemperatur, der Radius und die Helligkeit eines stabilen Sterns sind praktisch konstant. Die Kernreaktionen im Zentrum erzeugen gerade genug Energie um ein Gleichgewicht zwischen dem nach außen gerichteten Druck aufgrund der erzeugten Hitze und der nach innen gerichteten Gravitationskraft zu schaffen.

Die Masse eines Heliumkerns ist nur 99.3% der Masse der vier ursprünglichen Wasserstoffkerne. Bei der Kernfusion werden die übrigen 0.7% der Masse in Energie — hauptsächlich elektromagnetische Strahlung — umgewandelt. Die Menge an Energie kann mit Einsteins bekannter Formel  $E = Mc^2$  berechnet werden. Weil  $c^2$  eine große Zahl ist folgt, dass bereits dieser kleine Prozentsatz an Materie beim Umwandeln in Strahlung einer gewaltigen Energiemenge entspricht. Die restlichen 0,7% der Masse von 4 Protonen, die in einer einzelnen Reaktion beteiligt sind, mag immer noch winzig erscheinen, aber wenn man die Gesamtzahl an Fusionsreaktionen im

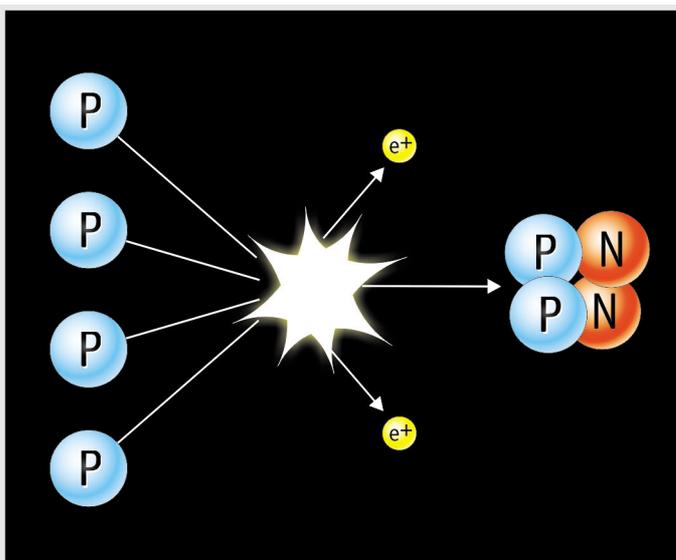
Inneren eines Sterns berücksichtigt, dann entspricht dies einer beträchtlichen Gesamtmasse (und damit Energie), die abgestrahlt wird.

### Sternhaufen

Der Begriff Sternhaufen wird für zwei verschiedene Arten von Sternengruppen verwendet: offener Sternhaufen und Kugelsternhaufen.

Offene Sternhaufen sind lockere Anordnungen von hundert bis einige tausend relativ junger Sterne. Diese sind typischerweise einige hundert Millionen Jahre alt, einem Bruchteil des Alters von einigen Milliarden Jahren, die ein Stern für seine Entwicklung braucht. Diese offenen Sternhaufen findet man in der Scheibe unserer Galaxie, der Milchstraße, und sie

enthalten oft Gas und Staub, in dem neue Sterne entstehen. Der typische Durchmesser eines offenen Sternhaufens ist etwa 30 Lichtjahre (oder 10 parsecs).



**Abbildung 2: Wasserstoffbrennen**

Die einfachste Form der Energieerzeugung in Sternen ist das Verschmelzen von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern. Die Reaktion läuft in mehreren Schritten ab. Hier ist nur die Gesamtreaktion ohne Zwischenschritte schematisch gezeigt.



## Einleitung



**Abbildung 3: Die Plejaden (Messier 45) im Sternbild des Stier**

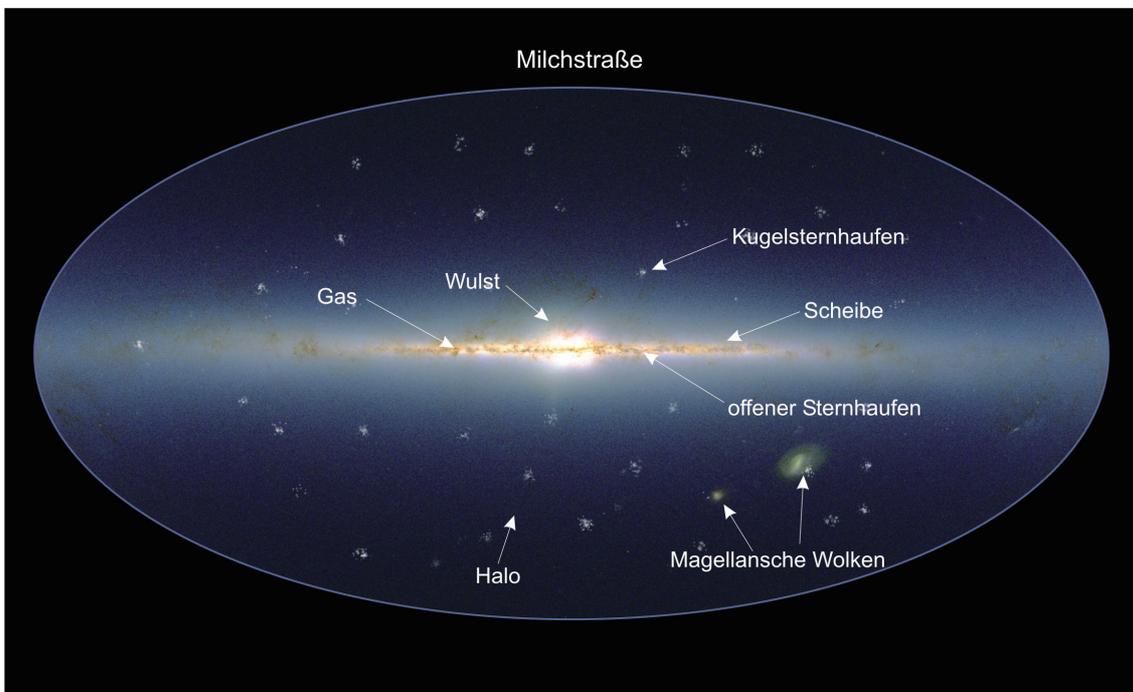
Dies ist einer der bekanntesten Sternhaufen am Himmel. Die Plejaden können mit bloßem Auge sogar in Großstädten mit starker Luftverschmutzung gesehen werden. Sie sind einer der hellsten und nächst gelegenen offenen Sternhaufen. Der Plejaden Sternhaufen umfasst mehr als 3000 Sterne, ist etwa 400 Lichtjahre von der Erde entfernt und hat einen Durchmesser von nur 13 Lichtjahren (mit Genehmigung von Bruno Stampfer und Rainer Eisendle).

### Kugelsternhaufen — die ältesten Strukturen in der Milchstraße

In der Scheibe und im Halo unserer Milchstraße gibt es einige hundert kompakte, sphärische Sternhaufen, die man Kugelsternhaufen nennt.

Diese sind über die Gravitation an die Milchstraße gekoppelt.

Jeder Kugelsternhaufen besteht aus einer sphärisch angeordneten Gruppe von bis zu einer Million Sterne und hat typischerweise einen Durch-



**Abbildung 4: Die Milchstraße**

Diese Illustration zeigt einen Überblick der Milchstraße. Verschiedenen Teile dieses komplizierten Systems aus Sternen, Gas und Staub sind beschriftet. Die Ebene der Scheibe liegt auf der zentralen, horizontalen Linie. Die Kugelsternhaufen sind in einem kugelförmigen Halo um das galaktische Zentrum angeordnet. Es wird angenommen, dass diese Anordnung mit der Tatsache zusammenhängt, dass diese Sternhaufen sich zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Geschichte der Galaxie gebildet haben.



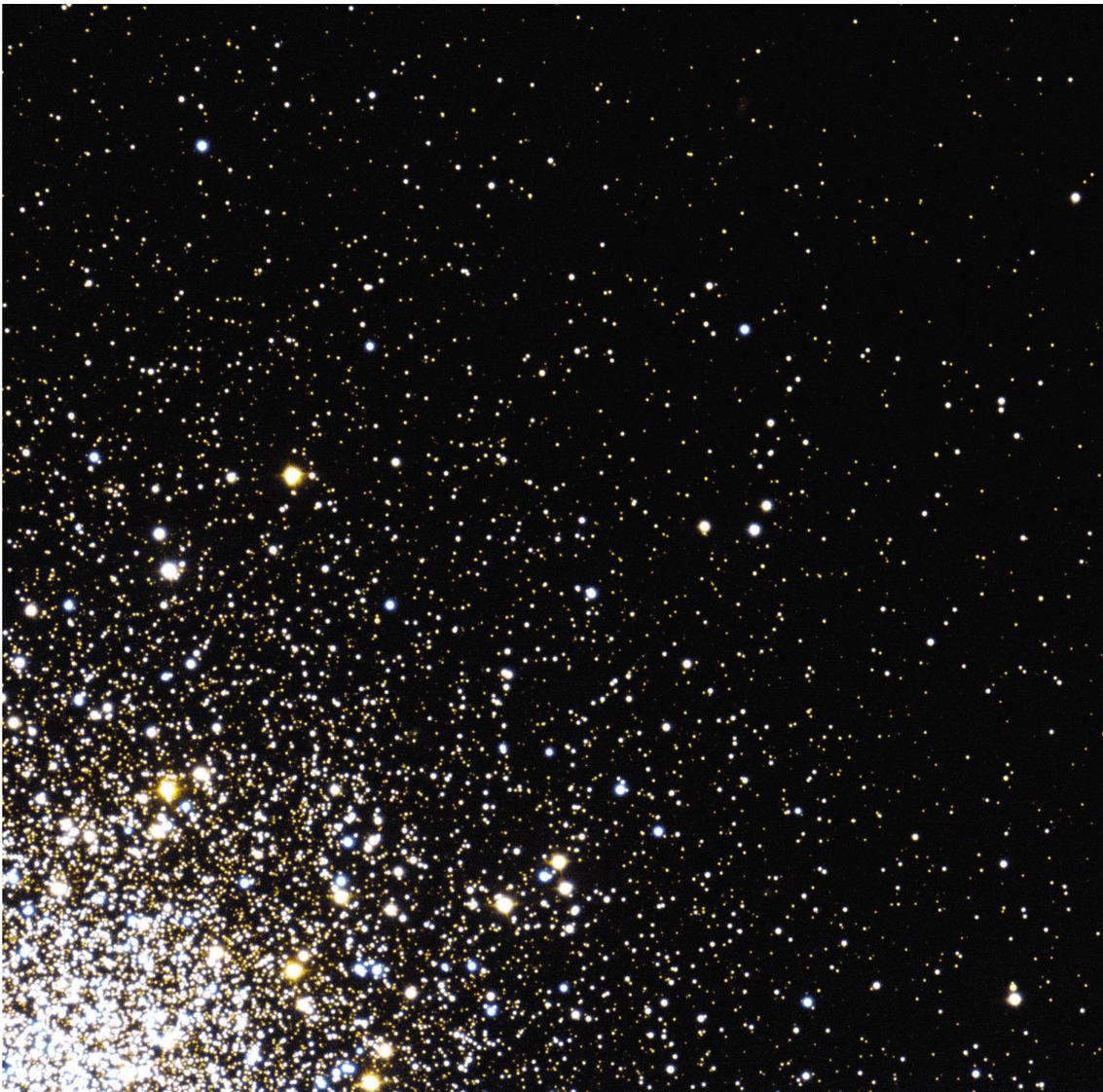
## Einleitung

messer von etwa 100 Lichtjahren. Die meisten Kugelsternhaufen sind sehr alt und wurden höchstwahrscheinlich noch vor dem Entstehen der Galaxie gebildet. Dies geschah vor etwa 12 Milliarden Jahren als der Großteil der protogalaktischen Materie sich in der Scheibe ansammelte.

Viele Kugelsternhaufen dürften in den vergangenen Milliarden Jahren durch wiederholte Kollisionen untereinander oder mit der Milchstraße

vernichtet worden sein. Die noch existierenden Kugelsternhaufen sind älter als jede andere Struktur in unserer Milchstraße.

Die astrophysikalische Untersuchung von Kugelsternhaufen stellt einen wichtigen Teil der Forschungsinteressen der internationalen astronomischen Gemeinschaft dar. Die Bedeutung dieser Sternhaufen stammt nicht nur aus der Verwendungsmöglichkeit als Testobjekte für Theorien zur Sternstruktur und Sternentwicklung, sondern sie gehören zu den wenigen Ob-



**Abbildung 5: Der Randbereich des Kugelsternhaufens M12**

Dieses Zweifarbenbild wurde aus zwei Aufnahmen des ESO Very Large Telescope (VLT), von denen eine mit einem blauen (B) und eine mit einem grünen (V) Filter gemacht wurden, zusammengesetzt. In diesem Zweifarbenbild ist der B-Anteil als blau und der V-Anteil als rot dargestellt. Einige Sterne sind im B-Anteil deutlich größer (die blau Sterne dieser Abbildung), während andere in der V-Aufnahme heller sind (die gelblichen Sterne).



## Einleitung

jektten in der Galaxie, von denen das Alter relativ genau bestimmt werden kann. Wegen ihres extrem hohen Alters liefern Kugelsternhaufen eine sinnvolle untere Grenze des Alters des Universums. Die Altersverteilung und der Zusammenhang zwischen dem Alter und der elementaren Zusammensetzung von Kugelsternhaufen machen diese Systeme zu unschätzbaren Sonden in der Erforschung der Prozesse zur Entstehung von Galaxien.

Alle Sterne eines Kugelsternhaufens haben eine gemeinsame Vergangenheit und unterscheiden sich nur in ihrer Masse. Damit eignen sich Kugelsternhaufen auch ideal zur Erforschung der

Sternentwicklung. In der folgenden Übung sollen einige Eigenschaften eines bestimmten Kugelsternhaufens bestimmt werden, der als Messier 12 benannt ist.

### Der Kugelsternhaufen Messier 12

Der Kugelsternhaufen Messier 12 (oder M12), der auch als NGC 6218 bekannt ist, wurde 1764 von Charles Messier entdeckt und wurde daher das 12. Messierobjekt. Wie viele andere Kugelsternhaufen beschrieb Messier ihn als ‚Nebel ohne Sterne‘, was auf die schwache Auflösung seines Teleskops zurückzuführen ist. William Herschel konnte 1783 zum ersten mal einzelne Sterne in M12 erkennen.

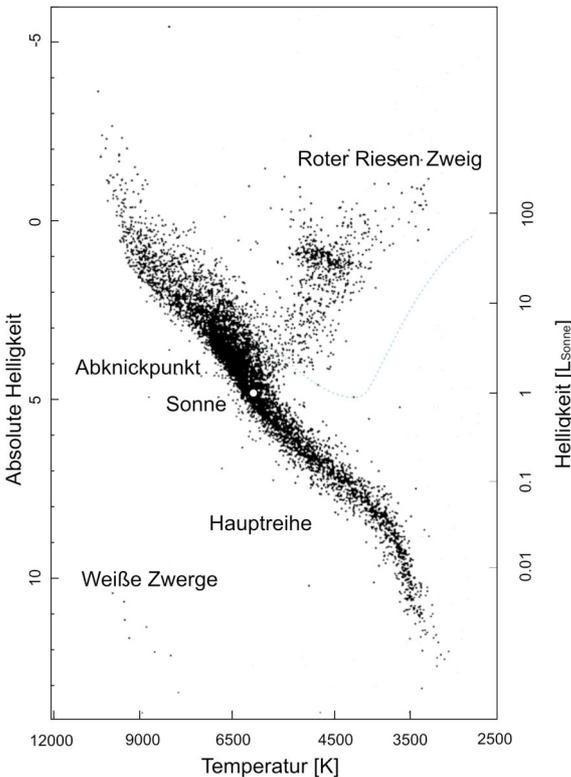
M12 liegt im Sternbild des Ophiuchus und kann mit einem Feldstecher an Orten mit sehr wenig Luftverschmutzung gesehen werden. Die Helligkeit des gesamten Sternhaufens ist im sichtbaren Bereich 6,7 (mehr zur Helligkeit von Himmelskörpern steht auf Seite 2 der astronomischen Werkzeuge) und der hellste Stern des Haufens hat eine Helligkeit im Sichtbaren von 12.

Der NGC (New General Catalogue) wurde 1888 veröffentlicht. Dieser Katalog enthält offene und Kugelsternhaufen, diffuse und planetare Nebel, Supernovaüberreste, alle Arten von Galaxien und sogar einige fehlerhafte Einträge, die keinem astronomischen Objekt zugeordnet werden können.

### Das Hertzsprung-Russel Diagramm

Ein Graph, in dem die relative Helligkeit  $L$  (oder die absolute Helligkeit  $M$ ) gegen die Oberflächentemperatur der Sterne aufgetragen ist, wird als Hertzsprung-Russel Diagramm (oder kurz H-R Diagramm) bezeichnet. Abbildung 6 zeigt ein umfassendes Beispiel, welches die Daten von Sternen aus benachbarten Sternhaufen enthält, deren Abstand bekannt ist (aus Messungen von HIPPARCOS). Die Oberflächentemperatur eines Sterns kann aus den Messungen seiner Farbe ( $m_B - m_V$ ) bestimmt werden (siehe astronomischen Werkzeuge).

Beim Betrachten des H-R Diagramms fällt auf, dass die ( $L, T$ ) Werte von Sternen ein eigenarti-



**Abbildung 6: Ein Hertzsprung-Russel Diagramm benachbarter Sterne**

Das H-R Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Helligkeit von Sternen. Auffallend sind die Hauptreihe und der Bereich der roten Riesen und weißen Zwerge. Die Position der Sonne, sowie die „Bahn“ auf der sich ein Stern mit der selben Masse wie die Sonne in den verschiedenen Phasen seines Lebens befindet, sind im Diagramm eingezeichnet. Die Position der Sonne ist im Diagramm durch ihre Oberflächentemperatur von 5800K und ihrer absoluten Helligkeit von +4,8 bestimmt



## Einleitung

ges Muster in dieser Darstellungsweise ergeben. Die Sterne häufen sich in bestimmten Bereichen, die in Abbildung 6 entsprechend bezeichnet sind. Das H-R Diagramm liefert den Schlüssel zum Verständnis wie Sterne sich mit der Zeit entwickeln. Abhängig von der Masse, werden sich verschiedene Sterne auf spezifischen Bahnen durch das Diagramm bewegen.

### Sternentwicklung im H-R Diagramm

Die meiste Zeit ihres Lebens befinden sich Sterne auf der Hauptreihe und verbrennen langsam in einem stabilen Gleichgewicht ihrem Wasserstoffvorrat. Dies ist auch der Grund weshalb sich die meisten Sterne auf der Hauptreihe befinden, die näherungsweise eine Gerade von links oben nach rechts unten im Diagramm ist. Sobald ein Stern seinen Vorrat an Wasserstoff im Zentrum aufgebraucht hat ist Wasserstoffbrennen nicht mehr möglich. Dies beendet die Phase im Leben des Sterns, in der er sich auf der Hauptreihe befindet. Das Gleichgewicht aus Gasdruck und Kontraktion, aufgrund der Gravitation, im Zentrum des Sterns ist nicht mehr gegeben. Die Verschmelzung von Wasserstoff findet nun in Schichten um den Kern statt, während dieser zu schrumpfen beginnt. Dabei

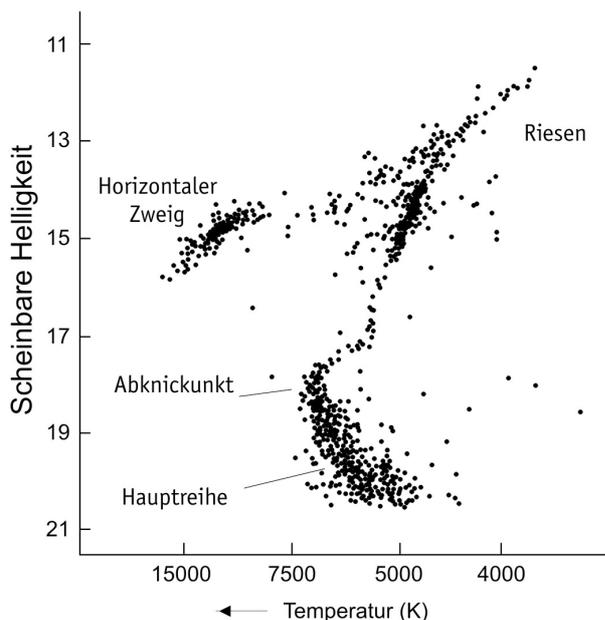
steigt der Druck und die Temperatur im Inneren des Sterns so weit an, dass Heliumkerne zu schwereren Elementen verschmelzt werden. Dieser Vorgang der Fusion von den immer schwereren Atomkernen in immer noch schwerere Elemente kann sich noch einige male Wiederholen wenn der Vorrat an einem leichten Element im Zentrum des Sterns zu Ende geht. Während dieser Phase erscheint der Stern als roter Riese. Im H-R Diagramm sind solche Sterne rechts oben von der Hauptreihe zu finden. Die höhere Kerntemperatur des Sterns führt zu einem Ausdehnen und gleichzeitigen Abkühlen der äußeren Hüllen, was zu einem sinken der Oberflächentemperatur führt. Der Stern wird sehr groß und aufgrund der relativ niedrigen Oberflächentemperatur strahlt er hauptsächlich im langwelligen Spektralbereich ab und erscheint rot.

Trotz der niedrigen Oberflächentemperatur haben alle roten Riesen aufgrund ihres gewaltigen Radius  $R$  eine große Helligkeit  $L$ . Das kann durch das Stefan-Boltzmann Strahlungsgesetz für Schwarzkörperstrahlung erklärt werden:

$$L = \sigma 4\pi R^2 T^4$$

Wobei  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann Konstante ist. Typische Werte für rote Riesen sind  $R \sim 10^2 R_{\text{SONNE}}$ ,  $T \sim (3..4)10^3 \text{ K}$ , und somit ergibt sich für  $L$  ungefähr  $10^3 L_{\text{SONNE}}$ .

Sobald die Verschmelzung von schwereren Elementen im Sterninneren nicht mehr möglich ist, kollabiert der Kern des Sterns noch einmal. Wieder steigt die Temperatur im Inneren des



### Abbildung 7: Ein typisches Hertzsprung-Russell Diagramm eines Kugelsternhaufens

Nach Milliarden Jahren der Entwicklung ist die Hauptreihe des H-R Diagramms eines Kugelsternhaufens nur mehr eine kurze Linie am rechten unteren Ende. Ein Bereich, der als roter Riesen Zweig genannt wird, beginnt bei der Hauptreihe und zieht sich zum rechten oberen Teil des Diagramms. Der Punkt, an dem sich die Hauptreihe und der rote Riesen Zweig schneiden wird Abnickpunkt genannt.



## Einleitung

Sterns an und die äußeren Hüllen des Sterns werden abgesprengt. Ein sogenannter planetarer Nebel wird aus den Resten der Sternhülle gebildet (siehe dazu die ESA/ESO Astronomieübung 3). Der kollabierte Kern ist sehr heiß (weiße Farbe) und der Stern ist sehr klein. Mit gutem Grund wird so ein Stern als weißer Zwerg bezeichnet und er stellt das Endstadium eines normalen sonnenähnlichen Sterns dar.

Lasst uns einen Blick auf das H-R Diagramm (Abb. 6) werfen um einen groben Zusammenhang zwischen der Helligkeit  $L$  und der Oberflächentemperatur  $T$  für alle Sterne der Hauptreihe zu finden. Die näherungsweise gerade Linie der Hauptreihe überspannt eine Größenordnung an Temperatur ( $3 \times 10^3 \dots 3 \times 10^4$ ) K. Der Bereich an Helligkeit überstreicht 6 Größenordnungen ( $10^{-2} \dots 10^4$ )  $L_{\text{Sonne}}$ . Damit kann für die Sterne der Hauptreihe ein Zusammenhang von ungefähr  $L \propto T^6$  bestimmt werden.

Zum Beispiel:

- Ein massereicher Stern der Hauptreihe mit einer Oberflächentemperatur von etwa  $T_{\text{Stern}} = 1,0 \times 10^4$  K hat somit eine Helligkeit von etwa  $L_{\text{Stern}} = (10/5,8)^6 \cdot L_{\text{Sonne}}$ . In anderen Worten: dieser Stern ist etwa 26 mal heller als die Sonne (Die Helligkeit der Sonne hat den Standardwert von 1 auf dieser Helligkeitsskala).
- Ein Stern niedriger Masse mit  $T_{\text{Stern}} = 3,5 \times 10^3$  K hat eine Helligkeit von nur etwa 5% der Helligkeit der Sonne.

### B-V Farbindex: ein Anhaltspunkt für die Oberflächentemperatur

Die ganze Information, die wir von Sternen erhalten steckt in der Strahlung, die wir von ihnen erhalten. Wie in den Astronomischen Werkzeugen erklärt, können verschiedene Filter und Farbsysteme benützt werden um die Helligkeit eines Sterns zu messen. In dieser Übung verwenden wir ein B- und ein V-Bild. Im Rahmen Deiner Analyse dieser Bilder wirst Du scheinbare  $m_B$  und  $m_V$  Helligkeiten einer Stichprobe von Sternen dieses Sternhaufens bestimmen. Daraus kannst Du dann die  $m_B - m_V$  Werte (die B-V Farbindexe) berechnen. Damit wirst Du in der Lage sein, die Oberflächentemperatur dieser Sterne zu bestimmen (siehe auch Astronomische Werkzeuge).

### Das H-R Diagramm als Schlüssel zu einem Sternhaufen

Ein Sternhaufen ist eine Anordnung von Sternen. Das Leben eines Sternhaufens wird durch das Leben der verschiedenen Sterne aus denen er zusammengesetzt ist, bestimmt. Beobachtungen haben gezeigt, dass bei einem Kugelsternhaufen nur sehr wenig Gas und Staub übriggeblieben sind, sodass die Entstehung neuer Sterne sehr unwahrscheinlich ist. Alle Sterne die wir in einem Kugelsternhaufen sehen sind somit bereits ‚erwachsen‘ und haben sich entsprechend ihrer Masse auf verschiedenen Arten entwickelt.

Die meisten massearme Sterne liegen auf der Hauptreihe. Der Grund dafür ist das sehr langsame Aufbrauchen der Energievorräte von leichten Sternen. Sie verbrennen ihren Wasserstoffvorrat langsam und werden dies noch für weitere Milliarden von Jahren so tun. Aus diesem Grund bleiben diese Sterne lange auf der Hauptreihe.

Im Gegensatz dazu haben die schweren Sterne des Haufens ihren Vorrat an Wasserstoff im Zentrum des Sterns schon aufgebraucht und sind bereits zu roten Riesen geworden. Dies geschah schon vor langer Zeit und dadurch findet man heute keine massereichen, heiße Sterne mehr im linken Teil der Hauptreihe (siehe Abbildung 7). Diese Sterne befinden sich nun in dem diagonalen Bereich, der von der Hauptreihe beginnend zum rechten oberen Teil des Diagramms sich erstreckt und als roter Riesen-Ast bekannt ist.

Der Punkt, bei dem sich die Hauptreihe und der rote Riesen Ast schneiden wird Abknickpunkt genannt und gibt einen wichtigen Hinweis auf das Alter des Sternhaufens. In der folgenden Übung wirst Du die Koordinaten dieses Punktes in Deinem Diagramm messen und damit das Alter vom M12 bestimmen.



## Aufgabe

### Beobachtungen, Datenreduktion und Analyse

Der Kugelsternhaufen M12 wurde am 18. Juni 1999 unter Verwendung von FORS1 am Teleskop ANTU (UT1) des VLT am Paranal Observatorium (Chile) beobachtet. Für diese Übung haben wir einen Ausschnitt vom äußeren Teil des Haufens gewählt, in dem die Sterne etwas weniger dicht zusammen sind. Die Aufnahme wurde durch einen blauen Filter (B-Band) und durch einen grünen Filter (V-Band für visual) aufgenommen.

Um Aufnahmen von M12 und die Daten zu reduzieren (die Entfernung von instrumentellen Fehlern und anderen Artefakten von den Daten), braucht man ein großes Teleskop und spezielle Computerprogramme. Der eigentlich interessante Teil — die Analyse der Daten — folgt danach.

Die dieser Übung werden die Daten in bereits reduzierter Form zur Verfügung gestellt. Wir haben die Analyse etwas vereinfacht, indem einige Sterne ausgewählt worden sind, die für den gesamten Sternhaufen repräsentativ sind.

### Hinweise zur Analyse der Bilder

Für die Analyse der Bilder muss die Helligkeit im B- und V-Bild für jeden Stern sorgfältig bestimmt werden. Fehler, die in diesem ersten Teil der Übung gemacht werden, haben Einfluss auf die späteren Ergebnisse.

45 Sterne sind in sechs Gruppen geteilt:

**1** Fünf Sterne Nr 1-5 — ‚Trainingssterne‘

**2** Vier Sterne Nr 6 bis 9 — ‚Eichsterne‘

**3-6** Die übrigen Sterne sind in vier Gruppen eingeteilt (A, B, C und D) um die Arbeit zu verringern und genügend Zeit für genaue Messungen zu lassen.

Um die Messungen genauest möglich zu machen, empfehlen wir folgende Vorgehensweise:

- Platziere die Schablone (siehe Abb. 8, 9 unten) auf einen Stern und verschiebe sie hin und her. Suche die Werte, die gerade zu groß und zu klein sind. Dann bewege die Schablone

zwischen diese beiden Werten und miss die Helligkeit des Sterns. Wiederhole diesen Vorgang mehrere Male und middle die Werte.

- Verschiedene Gruppenmitglieder sollen jeden Stern mindestens zweimal messen und der Mittelwert dieser Messungen wird dann verwendet.

- Zwischen den Messungen der einzelnen Sterne soll das Training mit der Schablone wiederholt werden, um sicherzustellen, dass auf eine konsistente Weise die Helligkeit aller Sterne bestimmt wird.

### Aufgabe 1 B-Band Training

Die Helligkeit der Trainingssterne Nr. 1–5 ist in der Tabelle (Abbildung 10) aufgelistet.

- ? Verwende diese Sterne, um die Anwendung der Schablone zu üben, indem du Messungen auf dem B-Bild (Abbildung 8) machst und mit den Werten in der Tabelle vergleichst. Stell sicher, dass du dieselben Resultate erhältst.

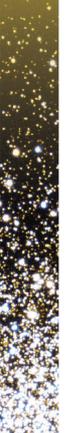
### Aufgabe 2 B-Band Eichung

Jede Gruppe soll die Eichsterne (Nr. 6–9) unabhängig voneinander ausmessen. Die Ergebnisse können dann mit den Resultaten der anderen Gruppen geeicht werden.

- ? Miss die Eichsterne im B-Bild (Abb. 8) und füge die Zahlenwerte zur Tabelle hinzu. Vergleiche Deine Resultate mit denen der anderen Gruppen. Wenn es Unterschiede gibt, schau Dir diese Sterne noch einmal an und gehe zu den Trainingssternen zurück.

### Aufgabe 3 B-Band Helligkeiten

- ? Miss die blaue Helligkeit ( $m_B$ ) von jedem beschrifteten Stern in dem dir zugewiesenen Bereich (A, B, C oder D in Abbildung 8) und füll die Messwerte in die Tabelle ein.





## Aufgabe

### Aufgabe 4 V-Band Training

- Übe selbständig das Messen am V-Bild (Abbildung 9) und vergleiche deine Werte mit denen in der Tabelle. Versuche dieselben Ergebnisse zu erhalten.

### Aufgabe 5

#### V-Band Eichung

- Miss die Eichsterne im V-Bild (Abb. 9) und füge die Zahlenwerte zur Tabelle hinzu. Vergleiche Deine Resultate mit denen der anderen Gruppen. Wenn es Unterschiede gibt, schau Dir diese Sterne noch einmal an und gehe zu den Trainingssternen zurück.

### Aufgabe 6

#### V-Band Helligkeiten

- Verwende Abbildung 9 zur Bestimmung der grünen Helligkeit ( $m_V$ ) jedes beschrifteten Sterns in dem Bereich, der dir zugewiesen wurde (A, B, C oder D). Füg diese Werte in die Tabelle ein.

### Aufgabe 7 Farbindex

- Berechne den ( $m_B - m_V$ ) Wert für jeden Stern und trag die Ergebnisse in die Tabelle ein.

### Aufgabe 8 Oberflächentemperatur

- Verwende das Diagramm, Abbildung 3 der astronomischen Werkzeuge, um die ( $m_B - m_V$ ) Werte in Oberflächentemperaturen, T, der Sterne zu konvertieren und trag die Ergebnisse in die Tabelle ein.

### Aufgabe 9 H-R Diagramm

Die Hauptreihe des Sternhaufens Hyaden ist im Diagramm (Abbildung 11) zum Vergleich eingezeichnet. Beachte, dass absolute Helligkeiten,  $M_V$ , für die Hyaden bestimmt worden sind.

- Trage die gemessenen scheinbaren Helligkeiten ( $m_V$ ) gegen die berechneten Oberflächentemperaturen (T) der entsprechenden Sterne von M12 in dasselbe Diagramm.

### Aufgabe 10 Hauptreihen Anpassung: Entfernungsmodul

Wir kennen jetzt ( $m_V, T$ ) für die Sterne von M12 und zum Vergleich sind ( $M_V, T$ ) der Hyaden als eine Standardhauptreihe bekannt. Das Entfernungsmodul (siehe Astronomische Werkzeuge) von M12 ist die Verschiebung in der vertikalen Achse zwischen den beiden Hauptreihen, die in Abbildung 12 eingetragen sind.

- Berechne das Entfernungsmodul  $m_V - M_V$  von M12.

### Aufgabe 11 Entfernung zu M12

- Verwende das Entfernungsmodul und die Abstandsgleichung (siehe Astronomische Werkzeuge, falls notwendig), um die Entfernung D von M12 zu bestimmen.

### Aufgabe 12 Extinktionskorrektur

Die Entfernung, die du gerade bestimmt hast, ist nicht ganz richtig, da unsere Galaxie eine Menge von Gas und Staub enthält, die das Licht von dahinterliegenden Sternen (oder darin eingebetteten Sternen) abschwächt. Der Staub und das Gas färben das Licht der Sterne auch rötlich aufgrund der wohlbekannten Rayleigh-Streuung (diese Art der Streuung ist besonders effektiv für Licht von kurzen Wellenlängen, also blauem Licht). Diese beiden Prozesse sind unter dem Namen, 'interstellare Extinktion' bekannt. Du sollst nun jenen Teil der Extinktion korrigieren, der zu einer Abschwächung des Lichts führt (es kommt dadurch zu Erhöhung des Magnitudenwerts und damit werden die Abstände zu groß berechnet). Das korrigierte Entfernungsmodul  $m - M$  ist:

$$m - M - A,$$

wobei A der Korrekturfaktor der Extinktion ist. Die Entfernungsgleichung verändert sich dadurch etwas zu:

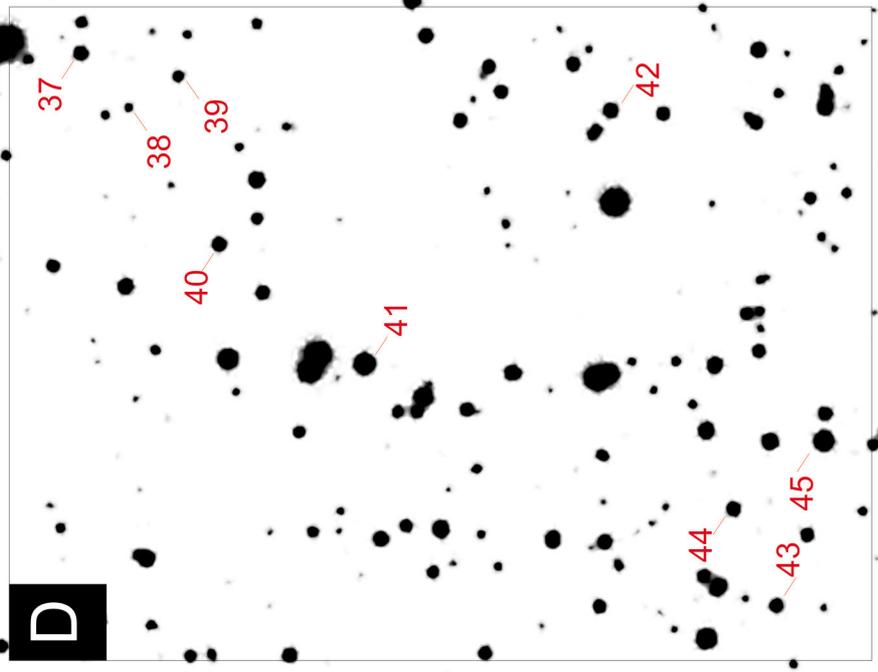
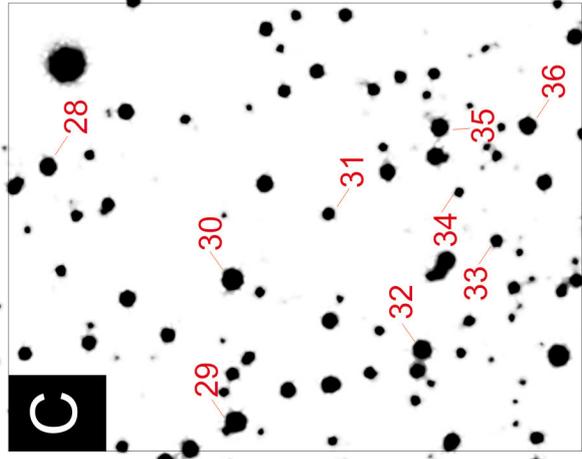
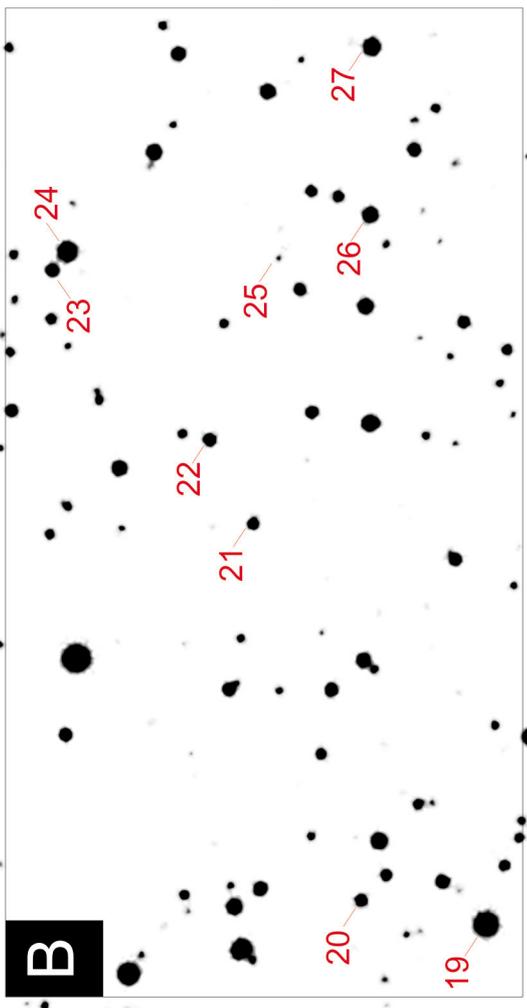
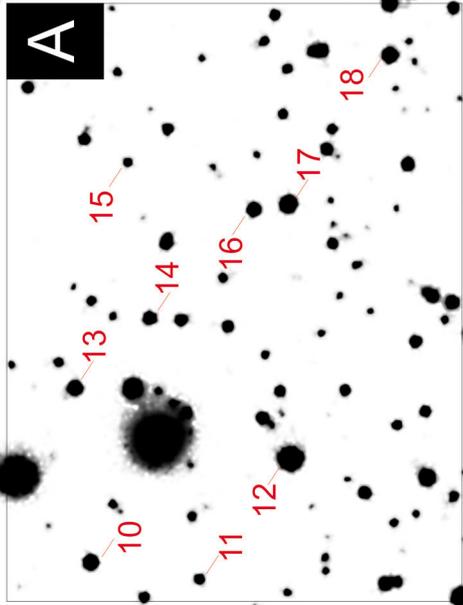
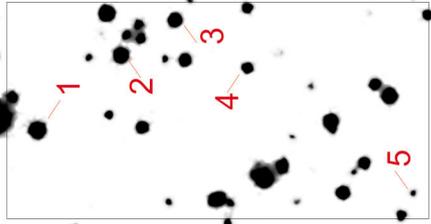
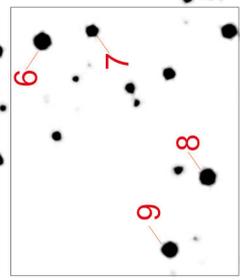
$$D = 10^{(m - M - A + 5)/5}$$

<sup>1</sup>Das ist wie bereits erwähnt eine Vereinfachung, denn es gibt noch einen weniger wichtigen Beitrag der Extinktion, die einen Einfluss auf den B-V (oder Temperatur) Term hat.

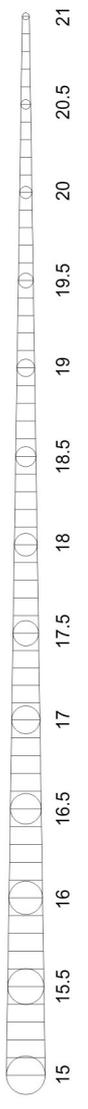


**B**

Abbildung 8: B-Band Bild

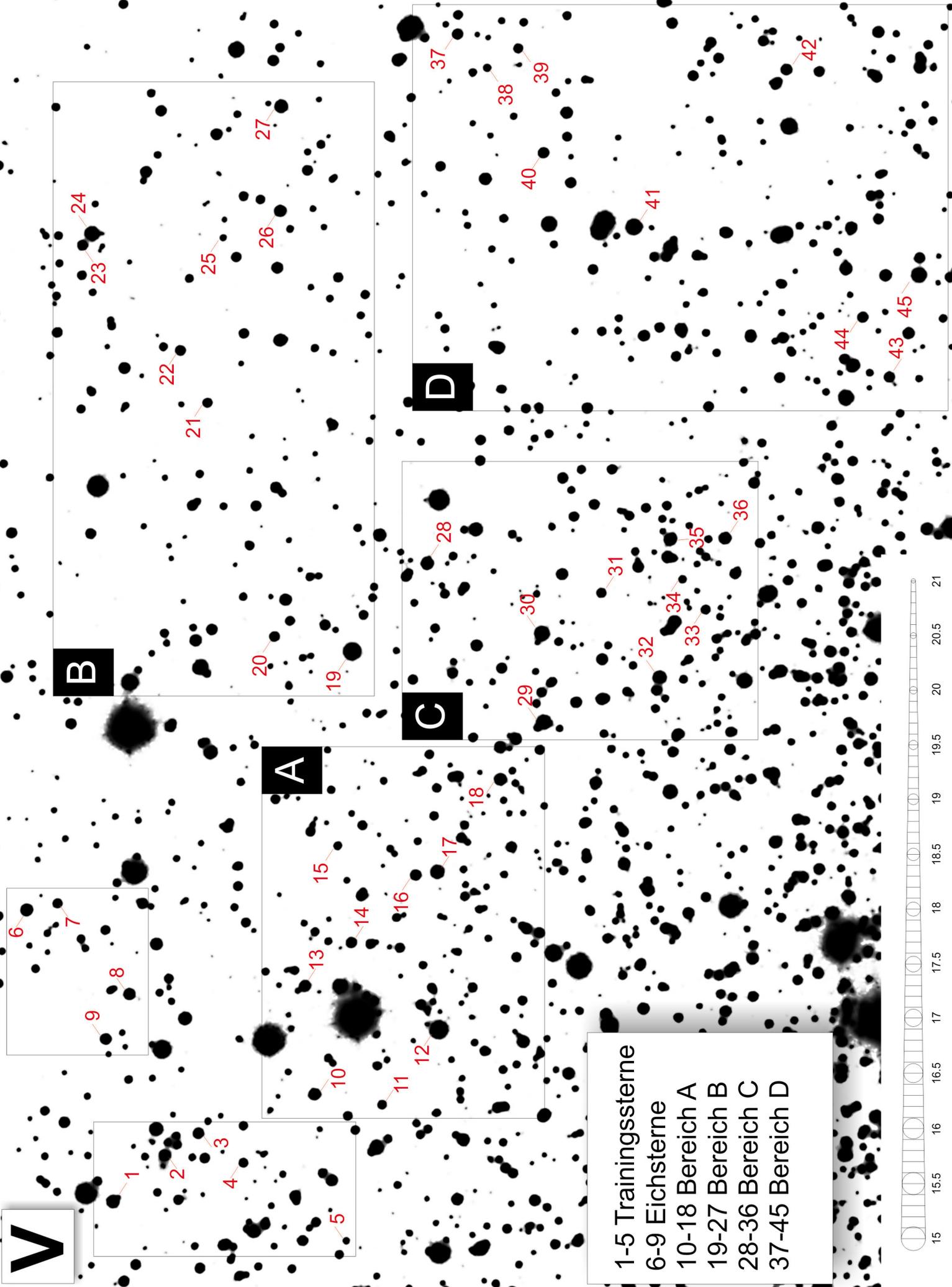


1-5 Trainingssterne  
6-9 Eichsterne  
10-18 Bereich A  
19-27 Bereich B  
28-36 Bereich C  
37-45 Bereich D

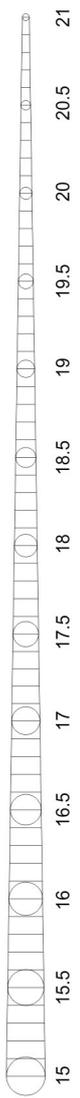


# V

Abbildung 9: V-Band Bild



- 1-5 Trainingssterne
- 6-9 Eichsterne
- 10-18 Bereich A
- 19-27 Bereich B
- 28-36 Bereich C
- 37-45 Bereich D





## Aufgabe

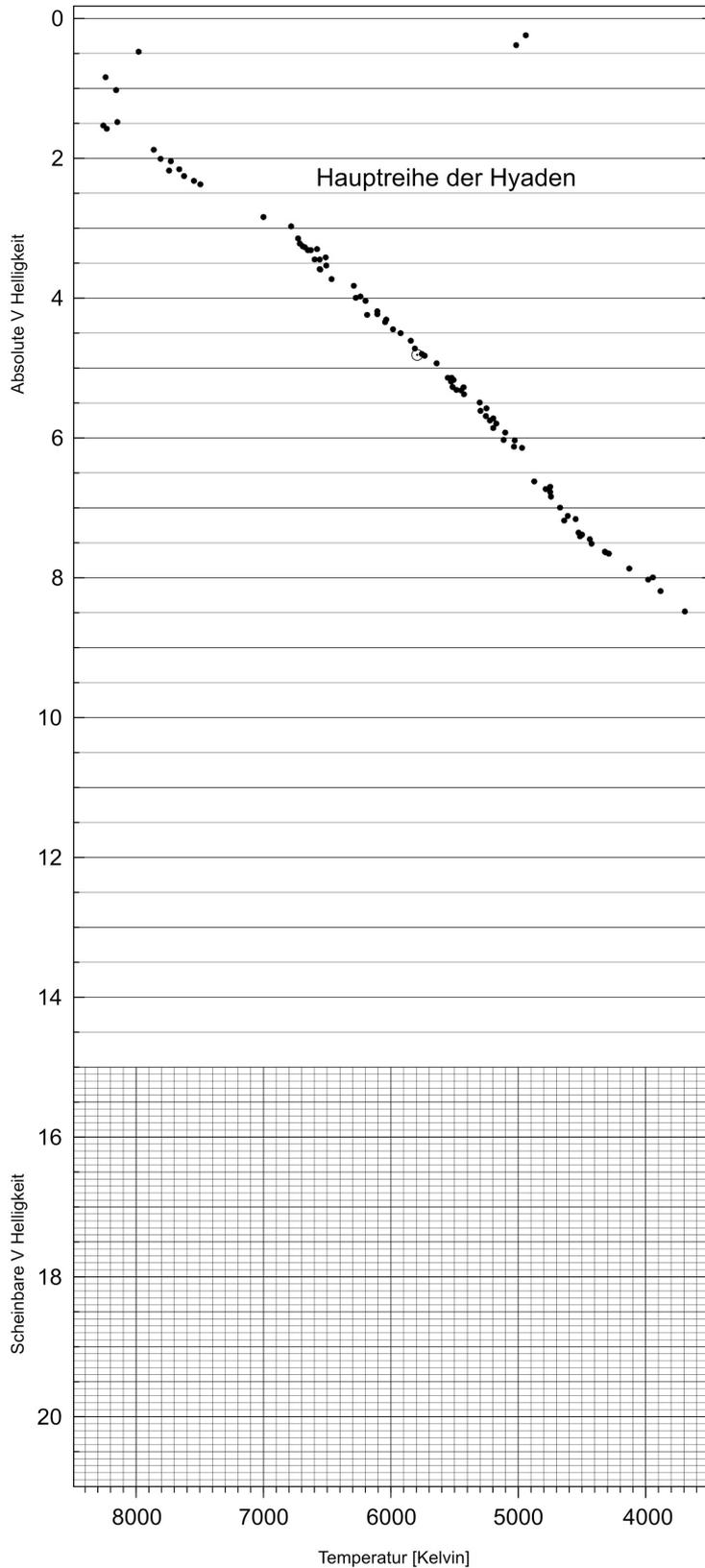
Abbildung 10: Wertetabelle

Stern	Werte der Wissenschaftler				Messungen/Berechnungen ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18,82	17,98	0,84	5250	18,70	17,90	0,8	5403
2	19,02	18,31	0,71	5744	19,00	18,20	0,8	5403
3	19,32	18,65	0,67	5864	19,30	18,70	0,6	6122
4	19,96	19,25	0,71	5699	19,90	19,10	0,8	5403
5	21,05	20,21	0,84	5265	21,00	20,10	0,9	5076
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								



## Aufgabe

Aufgabe



**Abbildung 11:**  
**Punktdiagramm**

Die Ergebnisse der Messungen von Aufgabe 1-9 sollen in diese Abbildung eingetragen werden. Die geeichte Hauptreihe des Sternhaufens der Hyaden wurde mit dem ESA Satelliten HIPPARCOS bestimmt (nach de Bruijne et al., 2001)



## Aufgabe

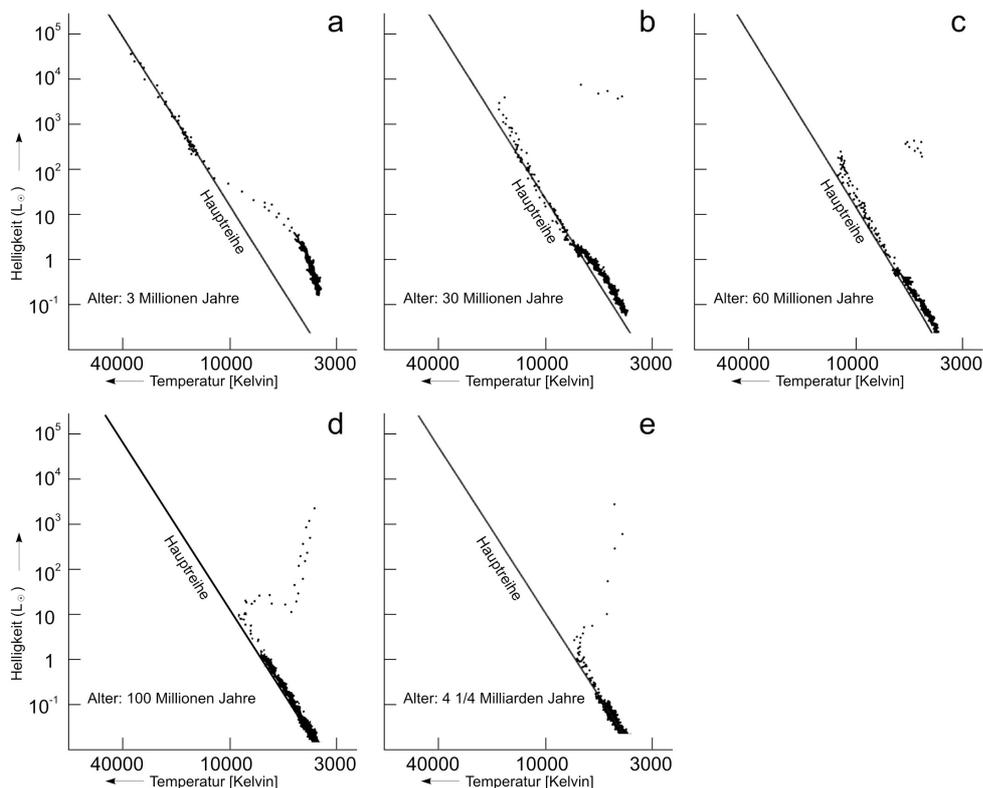
Harris und Mitarbeiter haben  $A$  für M12 als 0.57 Magnitudenwerte bestimmt (dieser Wert gilt für das V-Band, welches in unserem Fall für die m-M Messung verwendet worden ist).

- ☐ Berechne einen neuen Abstand, der hinsichtlich der interstellaren Extinktion korrigiert wurde.
- ☐ Unterscheidet sich dieser neue Wert vom unkorrigierten Abstand, der in Aufgabe 11 bestimmt worden ist?

- ☐ Diskutiere den Unterschied und diskutiere die Folgen die diese Korrektur (eine von vielen, die Astronomen in ihrem täglichen Leben machen) für das Verständnis der Größe des Universums hat.

### Aufgabe 13

Bereits früher haben Wissenschaftler den Abstand zum Sternhaufen M12 mit  $D = 4900$  parsec aus einer größeren Datenmenge bestimmt. Für den Fall, dass deine Ergebnisse weniger als 20% von diesem Wert abweichen, sind deine Messungen genau und die Berechnungen richtig gemacht worden. Du kannst stolz auf deine Arbeit sein!



**Abbildung 12: Die Entwicklung eines theoretischen Sternhaufens**

Die Berechnung, wie sich die Sternentwicklung auf eine Auswahl an Sternen über die Zeit hinweg auswirkt, ist in dieser Reihe an H-R Diagrammen gezeigt. In 12a befinden sich die hellsten und größten Sterne auf der Hauptreihe ( $T > 10\,000$  K) und die kleinen Sterne starten gerade mit dem Wasserstoffbrennen (niedrige Temperatur, niedrige Helligkeit)

In 12b haben die größten Sterne den Großteil des Wasserstoffvorrats im Sterninneren bereits aufgebraucht und verbrennen die Wasserstoffreserven in den Hüllen. Ihre Helligkeit hat abgenommen und sie sind roter geworden. Sie haben sich von der Hauptreihe entfernt, der Rote-Riesenast beginnt zu erscheinen und der Abknickpunkt ist erkenntlich. Keine heißen und hellen Sterne sind auf dem oberen Teil der Hauptreihe übrig geblieben.

In 12c-e ist der obere Teil der Hauptreihe bereits völlig entvölkert, während der Ast der roten Riesen bereits viel mehr Sterne aufweist. Der untere Teil der Hauptreihe deutet auf eine große Anzahl an Sternen mit der Masse einer Sonne hin, deren Oberflächentemperatur im Bereich zwischen 4000 und 8000 K liegen. Diese Sterne werden noch für weitere Milliarden von Jahren in dieser Phase verbleiben. (adaptiert nach R. Kippenhahn).



## Aufgabe

Für den Fall einer größeren Abweichung gibt es verschiedene Gründe. Einige Möglichkeiten sind:

- Sind die Messungen der Helligkeit genau genug?
- Kannst du dir bessere Methoden vorstellen, um die Daten zu reduzieren und an die Hauptreihe anzupassen?
- Denke über andere Möglichkeiten der Verbesserung deiner Ergebnisse nach.

### Entwicklung eines Kugelsternhaufens

Unabhängig vom Alters eines Kugelsternhaufens ist die Form der Hauptreihe für alle Haufen praktisch identisch. Die oben verwendete Methode der Hauptreihenanpassung könnte in gleicher Weise für andere Sternhaufen eines beliebigen Alters angewendet werden, um seinen Abstand auf dieselbe Weise zu bestimmen.

Jedoch zeigen Beobachtungen der H-R Diagramme verschiedener Haufen, dass der obere Teil der Hauptreihe seine Form mit dem Alter verändert (siehe Abbildung 12). In älteren Sternhaufen haben sich die hellsten Sterne bereits in den Roten-Riesenast bewegt. Als Ergebnis wurde der obere Teil der Hauptreihe kürzer und die Verbindung der Hauptreihe zum Roten-Riesenast (der Abknickpunkt) bewegt sich nach unten. Ähnlich einer Kerze, die mit der Zeit nach unten brennt.

Wir können aus der Position des Abknickpunkts daher einen wichtigen Hinweis auf das Alter des Sternhaufens erhalten.

### Aufgabe 14 Abknickpunkt: von der Helligkeit zur Leuchtkraft

- ?
- Bestimme die scheinbare Helligkeit eines Sterns am Abknickpunkt von M12. Berechne die Leuchtkraft dieses Sterns relativ zur Leuchtkraft der Sonne unter Verwendung der Formeln, die in den astronomischen Werkzeugen zu finden sind.

### Abknickpunkt: von der Leuchtkraft zur Masse

Sobald die Leuchtkraft bekannt ist, können wir die Masse des Sterns unter Verwendung der Masse-Leuchtkraft-Beziehung bestimmen. Für

Sterne der Hauptreihe ist ein Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft beobachtet worden, in dem die Leuchtkraft und Masse relativ zu den Werten der Sonne ausgedrückt werden

( $L_{\text{Sonne}} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$ ,  $M_{\text{Sonne}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ ):

$$L = M^{3.8}$$

### Aufgabe 15

- ?
- Wandle die Leuchtkraft, die in Aufgabe 14 bestimmt worden ist, in eine Masse relativ zur Sonnenmasse um.

### Abknickpunkt: von der Masse zum Alter

Die Lebensdauer  $t$ , die ein Stern auf der Hauptreihe verbringt, hängt von seiner Leuchtkraft und Masse ab.

- Ein Stern mit großer Leuchtkraft verbrennt in jeder Sekunde mehr Wasserstoff als ein Stern mit geringer Leuchtkraft. Dadurch nimmt die Menge an Wasserstoff bei großer Leuchtkraft wesentlich schneller ab als bei einem Stern mit kleiner Leuchtkraft und je kleiner die Leuchtkraft, umso länger kann der Stern Wasserstoff verbrennen.
- Für zwei Sterne verschiedener Masse besitzt der schwerere Stern mehr Brennmaterial. Dadurch erkennen wir, dass die Lebensdauer des Sterns mit seiner Masse in direkter Proportion und mit seiner Leuchtkraft in indirekter Proportion steht.

Unter Verwendung der Masse-Leuchtkraft-Relation können wir die Lebensdauer als Funktion der Masse bestimmen:

$$t \propto M^{-2.8}$$

### Aufgabe 16

- ?
- Benütze die in Aufgabe 15 bestimmte Masse und schätze das Alter des Kugelsternhaufen relativ zum geschätzten Alter  $d$  Sonne, welche mit einem Alter von  $8.2 \times 10^9$  Jahren die Hauptreihe verlassen wird.

Daraus kann geschlossen werden, dass das Alter des gesamten Universums größer sein muss als das Alter, das in Aufgabe 16 bestimmt worden ist.



## Weitere Aufgaben



**Abbildung 13: Übersichtsaufnahme einer Kugelsternhaufens**

Dieses Bild zeigt M12. Jede Kante der Abbildung entspricht einem Winkel von 0,25 Grad (vom „Digitized Sky Survey“).

### Weitere Aufgaben:

Abbildung 13: Übersichtsaufnahme eines Kugelsternhaufens  
Dieses Bild zeigt M12. Jede Kante der Abbildung entspricht einem Winkel von 0,25 Grad (vom „Digitized Sky Survey“).

#### Bestimmung des Durchmessers

Um den Durchmesser vom M12 zu bestimmen muss der Winkel unter dem der Sternhaufen zu sehen ist bekannt sein. In Abbildung 13 sind

viele Sterne im Zentrum des Sternhaufens zu finden. Diskutiere welche Sterne zum Randbereich des Sternhaufens gehören.

#### Aufgabe 17

- ? Miss den Winkeldurchmesser,  $\alpha$ , des Sternhaufens M12 in Zentimetern und rechne diesen Wert ins Bogenmaß (siehe Mathematische Werkzeuge).



## Weitere Aufgaben

- ? Berechne danach den Durchmesser,  $d$  (verwende dazu die Näherung für kleine Winkel, die in den Mathematischen Werkzeugen auf Seite 8 zu finden ist).

Zur Berechnung kann sowohl der selbst bestimmte Abstand oder der von den Wissenschaftlern bestimmte Wert von  $D = 4900$  parsec verwendet werden.

### Bestimmung der Gesamtanzahl an Sternen

Um die gesamte Zahl der Sterne,  $N$ , des Kugelsternhaufens abzuschätzen müssen wir einige Annahmen machen:

1. Der Sternhaufen besteht aus einer Mischung aus verschiedenartigen Sternen. Wir nehmen jedoch an, dass der durchschnittliche Stern ein sonnenähnlicher Stern sei und somit die absolute Helligkeit eines einzelnen Sterns in etwa gleich ist wie die der Sonne.
2. Wir nehmen an, dass jeder Stern mit seiner vollständigen Helligkeit zur gesamten Helligkeit des Sternhaufens beiträgt. In der Wirklichkeit werden jedoch Staub und andere Sterne einige Sterne teilweise oder ganz verdecken.

### Aufgabe 18

Die gesamte Helligkeit vom M12 beträgt

$$M_{\text{Haufen}} = -7,32$$

Die gesamte Leuchtkraft des Sternhaufens in Werten der Sonnenleuchtkraft kann über

$$L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}} = 2,512^{(M_{\text{Sonne}} - M_{\text{Haufen}})}$$

berechnet werden.

Zur Erinnerung:  $M_{\text{Sonne}} = 4,8$ .

Da  $L_{\text{Sonne}} \approx N \cdot L_{\text{Sonne}}$  und unter Verwendung der Näherung 1 folgt, dass  $L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}}$  ungefähr  $N$ , der Zahl der Sterne des Haufens, ist. Wir können jedoch aufgrund der Näherung 2 folgern, dass der tatsächliche Wert für  $N$  etwas größer sein wird als  $L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}}$ .



## Weitere Literatur

### Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

- de Bruijne, J.H.J., Hoogerneerf, R., and deZeeuw, P.T., 2001, A&A, 367, 111–147: *A Hipparcos study of the Hyades open cluster.*
- Cragin, M., Lucyk, J., Rappaport, B.: *The Deep Sky Field Guide to Uranometria 2000.0*, 1993-96, Willmann-Bell, Inc.
- Harris, W.E.: *Catalog of parameters for Milky Way Globular Clusters*, Revised: June 1999 (<http://physun.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
- Rosenberg, A., Saviane, I., Piotto, G., Aparicio, A., 1999, AJ, 118, 2306–2320: *Galactic Globular Cluster Relative Ages*
- Chaboyer, B., Demarque, P., Sarajedini, A., 1996, ApJ, 459–558: *Globular Cluster Ages and the Formation of the Galactic Halo*

Mehr zur interstellaren Extinktion kann unter <http://www.astro.virginia.edu/class/hawley/astr124/ism.html>  
<http://tesla.phys.unmu.edu/a111labs/cepheids/mags.html#Red>  
gefunden werden. [mags.html#Red](http://tesla.phys.unmu.edu/a111labs/cepheids/mags.html#Red)

Siehe auch Weblinks auf:  
<http://www.astroex.org/>



## Colophon



**Astronomische Übungsreihe der ESA/ESO**  
**Übung 4: Messen der Distanz und des Alters eines**  
**Kugelsternhaufens**  
**2. Ausgabe (23.05.2002)**

Produziert von:

the Hubble European Space Agency Information  
Centre und der Europäischen Südsternearte:  
<http://www.astroex.org/>  
(Pdf-Versionen dieses Materials und verwandte  
Weblinks finden sich unter dieser WWW-Adresse)

Postanschrift:

Europäische Südsternearte  
Karl-Schwarzschild-Str. 2  
D-85748 Garching bei München  
Deutschland

Telefon: +49 89 3200 6306 (oder 3200 60)

Fax: +49 89 3200 64 80 (oder 320 32 62)

E-mail: [info@astroex.org](mailto:info@astroex.org)

Ursprüngliche Idee und Text:

Emma Fosbury and Robert A.E. Fosbury

Text :

Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,  
Jean-Marc Brauer, and Arntraud Bacher

Grafik und Layout:

Martin Kornmesser

Übersetzung:

Paul Scheier, Arntraud Bacher

Koordination:

Lars Lindberg Christensen and Richard West

Dank an das Tycho Brahe Planetarium, Dänemark,  
für die Inspiration, an Wendy Freedmann, die die  
Daten zur Verfügung gestellt hat, und an Nina  
Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, für  
Kommentare.



## Anleitung Für den Lehrer

### Kurze Übersicht

Wir messen die blauen ( $m_B$ ) und grünen (sichtbaren,  $m_V$ ) Helligkeiten von ausgewählten Sternen in den äußeren Bereichen eines Kugelsternhaufens aus Bildern, die mit dem VLT aufgenommen worden sind. Die ( $m_B - m_V$ )-Werte werden in Oberflächentemperaturen ( $T$ ) umgerechnet und die  $m_V$  Werte als Funktion von  $T$  in ein Hertzsprung-Russel Diagramm eingetragen. Die Hauptreihe des Kugelsternhaufens, die in diesem Diagramm zu erkennen ist, wird mit der abstandskorrigierten Hauptreihe des benachbarten Sternhaufens Hyaden verglichen. Über eine Hauptreihenanpassung und unter Verwendung des Entfernungsmodul kann der Abstand zum untersuchten Sternhaufen bestimmt werden. Das Alter des Sternhaufens, welches zufälligerweise auch eine untere Grenze für das Alter des Universums darstellt, kann aus der Position des Abknickpunktes aus der Hauptreihe abgeschätzt werden.

Diese Anleitung für den Lehrer enthält die Lösungen der Aufgaben, die zusätzlich noch mit Kommentaren versehen sind und Diskussionen von allen Näherungen und Vereinfachungen, die gemacht worden sind. Weitere Folgerungen und Informationen zum Lebenskreislauf eines Sterns sind noch angeführt. Das Ziel ist es, den Nutzen der Übung zu maximieren und dem Lehrer bei der Vorbereitung des Unterrichts zu unterstützen.

### Zusätzliches zum Leben eines Sterns

Die Lebensdauer eines Sterns ist die Zeitspanne, die der Stern auf der Hauptreihe verbringt. Wir schätzen die Lebensdauer der Sonne ab und dann die Lebensdauer eines anderen Sterns relativ zur Lebensdauer der Sonne.

Ein Protostern wird aus interstellarer Materie geformt. Typischerweise besteht die interstellare Materie aus 74% Wasserstoff, 25% Helium und 1% aus schwereren Elementen.

Wenn die Temperatur im Inneren des Protosterns einige Millionen Grad Kelvin erreicht kann er mit dem Wasserstoffbrennen beginnen und wird zu einem Hauptreihenstern.

Vier Wasserstoffkerne verschmelzen zu einem Heliumkern. Da die Masse eines Heliumkerns nur 99,3% der Masse der vier Protonen hat, werden die restlichen 0,7% der Masse in Energie umgewandelt. Von jedem kg an Wasserstoff, der im Sterninneren zu Helium verschmolzt werden daher etwa 7g in Energie umgewandelt. Aus Einsteins Formel ( $E=Mc^2$ ), kann diese freiwerdende Energie als  $6,3 \times 10^{14}$  J/kg. ( $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit,  $3 \times 10^8$  m/s).

Die Leuchtkraft der Sonne beträgt  $L_{\text{Sonne}} = 3,85 \times 10^{26}$  W ( $W = \text{J/s}$ ). Daraus kann die Masse an Wasserstoff berechnet werden, der jede Sekunde in der Sonne verschmolzen wird:

$$\Delta M = 3,85 \times 10^{26} / (6,3 \times 10^{14}) = 6,11 \times 10^{11} \text{ kg/s}$$

Wenn ein Stern etwa 11% seiner Masse an Wasserstoff verbraucht hat wird er die Hauptreihe verlassen, da der Kern des Sterns dann instabil wird.

Aus der Gesamtmasse der Sonne, die  $M_{\text{Sonne}} = 2,0 \times 10^{30}$  kg beträgt, kann die Masse an Wasserstoff, der im gesamten Leben der Sonne verschmolzen werden kann, berechnet werden:

$$0,11 \times 0,74 \times 2 \times 10^{30} = 1,6 \times 10^{29} \text{ kg.}$$

Durch Division dieses Werts mit der Masse an Wasserstoff, den die Sonne jede Sekunde verbraucht kann die Gesamtzeit abgeschätzt werden, die die Sonne auf der Hauptreihe sein kann:

$$2,6 \times 10^{17} \text{ s} = 8,2 \times 10^9 \text{ y, } 1 \text{ y} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3,15 \times 10^7 \text{ s (also mehr als 8 Milliarden Jahre).}$$

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Sonne in etwa 4 Milliarden Jahre alt ist. Damit kann man erwarten, dass sich die Sonne noch weitere 4 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe befinden wird.



## Anleitung Für den Lehrer

Aus dem Wissen des Alters der Sonne kann das Alter jedes anderen Sterns relativ zum Alter der Sonne berechnet werden.

Die Lebensdauer eines jeden Sterns hängt von seiner Masse ab. Wir werden die komplizierten Argumentationen vereinfachen um eine einfache aber passende Formel zu erhalten:

Der Vorrat an Wasserstoff, der als Brennstoff zur Verfügung steht ist direkt proportional zur Masse eines Sterns und  $t$  ist umgekehrt proportional zur Leuchtkraft. Somit ist  $t \propto M/L$

Die Rate mit der ein Stern seine Energie verbraucht nimmt stark mit seiner Masse zu. Für Hauptreihensterne wurde aus experimentellen Ergebnissen folgender Zusammenhang näherungsweise gefunden:  $L = M^{3,8}$ , die sogenannte Masse-Leuchtkraft-Beziehung. Der Exponent von 3,8 ist ein Kompromiss. Er gilt für mittlere Sternmassen (0.5 ... 10)  $M_{\text{Sonne}}$ .

Damit erhalten wir (näherungsweise):  $t \propto M/L = M/M^{3,8} = M^{-2,8}$ ; wir erkennen dass massereiche Sterne sich viel schneller entwickeln als die Sonne und massearme Sterne viel langsamer.

Einige Beispiele:

Ein massereicher Stern von etwa zehnfacher Sonnenmasse hat eine Lebensdauer von nur  $t = 0,0016 t_{\text{Sonne}}$  oder etwa 13 Millionen Jahre.

Die Lebensdauer eines massearmen Sterns von etwa 0,6 Sonnenmassen beträgt dagegen  $t = 4,2 t_{\text{Sonne}}$  oder etwa 34 Milliarden Jahre. Diese Zeitspanne ist viel größer als das Alter des Universums. Damit hat im ganzen Universum noch kein massearmer Stern seine Zeit auf der Hauptreihe beendet.

### Auswahl der Sterne

Der Kugelsternhaufen M12 enthält in etwa 150.000 Sterne. Das Bild, welches in dieser Übung verwendet wird, wurde mit FORS1 am Teleskop ANTU (Einzelteleskop1 des VLT) aufgenommen. Es zeigt nur einen kleinen Bereich des äußeren Gebiets des Haufens. Dieser Ausschnitt wurde gewählt um den dichtesten Teil des Sternhaufens zu vermeiden, in dem Sterne scheinbar überlappen. Wir haben 45 Sterne so ausgewählt, dass sie für den gesamten Sternhaufen repräsentativ sind. Die Anzahl dieser Stichprobe ist so klein, dass der Arbeitsaufwand für diese Übung noch sinnvoll ist und gleichzeitig die Ergebnisse der Schüler noch gut mit den Werten der Wissenschaftler übereinstimmen, deren Ergebnisse mit einer wesentlich größeren Anzahl an Sternen erzielt worden sind. Ein Bild von M12 aus dem Digitized Sky Survey (DSS) wurde für weitere Aufgaben verwendet.

### Bildauswertung

Wir schlagen vor, dass jede Gruppe eine Schablone die auf eine transparente Folie kopiert ist benützt. Auf jedem Bild ist eine Schablone dazugezeichnet, damit die Größe der auf Folie kopierten Schablone überprüft werden kann. Beim Kopieren kann es leicht zu einer Veränderung der Größe kommen. Die Schüler sollen zuerst überprüfen, ob ihre transparenten Schablonen mit den in den Bildern eingezeichneten Schablonen übereinstimmen.

Wir schlagen vor, dass die Arbeit auf mehrere Gruppen von Schülern aufgeteilt wird und haben daher die Sterne in 6 Gruppen unterteilt (Training, Eichung, A, B, C und D). Für die 5 Trainingssterne ist die Helligkeit angegeben. Das Verwenden der Schablone kann an diesen fünf Sternen geübt werden bis die Messergebnisse wiederholbar sind. Danach können die vier Eichsterne von jeder Gruppe gemessen werden und die Ergebnisse zur Eichung der Messungen der einzelnen Gruppen verwendet werden. Damit können systematische Unterschiede beim Messen zwischen den einzelnen Gruppen gefunden und daraus resultierende Fehler verringert werden.

Um Fehler zu verringern empfehlen wir, dass jeder Stern von jeder Gruppe mindestens zweimal vermessen wird und die Ergebnisse gemittelt werden.

Es ist sehr wichtig, den Umgang mit der Schablone zu üben ehe man mit den eigentlichen Messungen beginnt. Messen bedeutet nicht einfach nur die Schablone über die Sterne legen! So soll ein Stern der Helligkeit 18,5 komplett innerhalb des passenden Kreises sein, aber der umgebende Himmel sollte den Kreis nur berühren. Die Schüler sollen jeden Stern auf diese Weise messen. Falls die Messungen konstant zu hoch oder zu niedrig ausfallen, können die eigentlichen Messwerte durch Addition der entsprechenden Differenz korrigiert werden.



## Anleitung Für den Lehrer

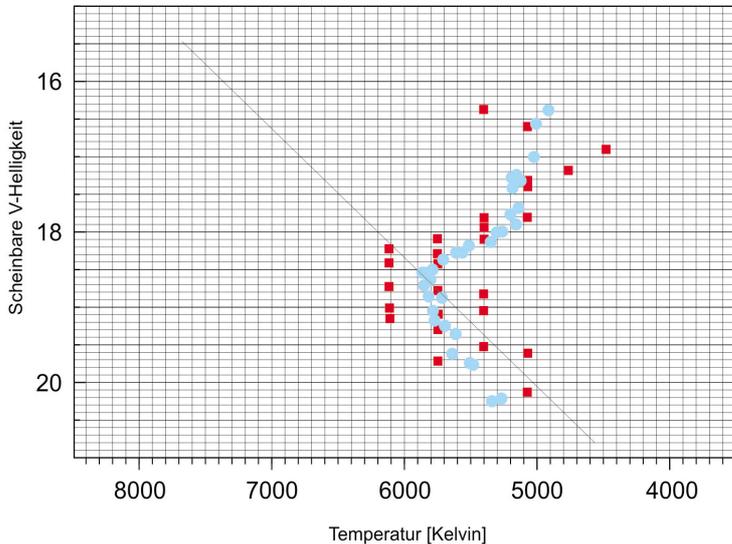
Stern	Werte der Wissenschaftler				Messungen/Berechnungen ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18.82	17.98	0.84	5250	18.70	17.90	0.8	5403
2	19.02	18.31	0.71	5744	19.00	18.20	0.8	5403
3	19.32	18.65	0.67	5864	19.30	18.70	0.6	6122
4	19.96	19.25	0.71	5699	19.90	19.10	0.8	5403
5	21.05	20.21	0.84	5265	21.00	20.10	0.9	5076
6	18.94	18.12	0.82	5348	19.00	18.20	0.8	5403
7	19.80	19.10	0.70	5757	19.80	19.20	0.6	6122
8	19.06	18.34	0.72	5702	19.00	18.40	0.6	6122
9	19.20	18.53	0.67	5844	19.10	18.50	0.6	5122
10	18.99	18.25	0.74	5614	19.00	18.20	0.8	5403
11	20.07	19.34	0.73	5620	20.10	19.40	0.7	5751
12	17.32	16.37	0.95	4918	17.20	16.40	0.8	5403
13	19.18	18.52	0.66	5884	19.10	18.50	0.6	6122
14	19.53	18.83	0.70	5722	19.60	18.80	0.8	5403
15	20.33	19.60	0.73	5639	20.30	19.50	0.8	5403
16	19.31	18.62	0.69	5792	19.30	18.60	0.7	5751
17	18.57	17.69	0.88	5140	18.70	17.80	0.9	5076
18	18.95	18.15	0.80	5405	18.90	18.10	0.8	5403
19	17.48	16.56	0.92	5012	17.50	16.60	0.9	5076
20	19.66	18.96	0.70	5738	19.60	18.80	0.8	5403
21	19.77	19.08	0.69	5792	19.80	19.00	0.8	5403
22	19.52	18.84	0.68	5818	19.50	18.80	0.7	5751
23	19.50	18.79	0.71	5734	19.50	18.90	0.6	6122
24	18.23	17.34	0.89	5122	18.30	17.40	0.9	5076
25	21.08	20.26	0.82	5345	21.10	20.20	0.9	5076
26	19.04	18.28	0.76	5552	18.90	18.20	0.7	5751
27	18.76	17.89	0.87	5160	18.80	18.10	0.7	5751
28	18.88	18.05	0.83	5309	18.90	18.10	0.8	5403
29	18.27	17.40	0.87	5183	18.30	17.40	0.9	5076
30	18.14	17.28	0.86	5189	18.20	17.30	0.9	5076
31	19.84	19.14	0.70	5783	19.80	19.10	0.7	5751
32	18.62	17.76	0.86	5197	18.60	17.80	0.8	5403
33	19.92	19.22	0.70	5725	19.90	19.20	0.7	5751
34	20.53	19.75	0.78	5487	20.40	19.70	0.7	5751
35	18.82	17.99	0.83	5300	18.80	18.00	0.8	5403
36	18.95	18.19	0.76	5511	18.80	18.20	0.6	6122
37	19.33	18.65	0.68	5812	19.30	18.70	0.6	6122
38	20.53	19.76	0.77	5502	20.50	19.60	0.9	5076
39	19.92	19.21	0.71	5734	19.90	19.20	0.7	5751
40	19.29	18.62	0.67	5861	19.30	18.70	0.6	6122
41	17.91	17.00	0.91	5026	18.00	16.90	1.1	4479
42	19.19	18.50	0.69	5789	19.20	18.50	0.7	5751
43	19.42	18.74	0.68	5831	19.30	18.70	0.6	6122
44	19.36	18.69	0.67	5841	19.30	18.70	0.6	6122
45	18.12	17.24	0.88	5145	18.20	17.20	1.0	4768

**Abbildung 1: Lösungen zu den Aufgaben 1 bis 8**

Die Tabelle gibt für alle nummerierten Sterne die Werte für B, V, B-V und T, die von den Wissenschaftlern bestimmt wurden. Unsere eigenen Messungen sind ebenfalls zu sehen.



## Anleitung Für den Lehrer



**Abbildung 2:**  
**Hertzsprung-Russel**  
**Diagramm von M12**  
Das Diagramm zeigt unsere Messungen (in rot) sowie die von Wissenschaftler erhaltene Ergebnisse (blau).

### Aufgabe 1-8

Die Werte der Wissenschaftler sowie unsere eigenen Messungen sind in einer Tabelle aufgelistet (siehe Abbildung 1).

### Aufgabe 9-13

Der untere Teil des Diagramms in Abbildung 3 ist relativ eng und die Ergebnisse sind stark von der Steigung der Kurve abhängig, die bestmöglich an die Daten angepasst wird. Um den Vorgang zu vereinfachen und um nicht zufriedenstellende Ergebnisse zu vermeiden haben wir angenommen, dass die Form der Hauptreihe für alle Sternhaufen in etwa gleich ist, unabhängig von ihrem Alter. Damit sollten alle Hauptreihen parallel verlaufen und wir können die Steigung der Hauptreihe des Hyadensternhaufens als Hilfe verwenden.

Der Wert von  $\sigma_D$  hängt von der Position der Hauptreihenlinie im Diagramm des Sternhaufens ab.

Harris gibt für  $m_v - M_v = 14,02$  vom M12. Wir messen **13,9**.

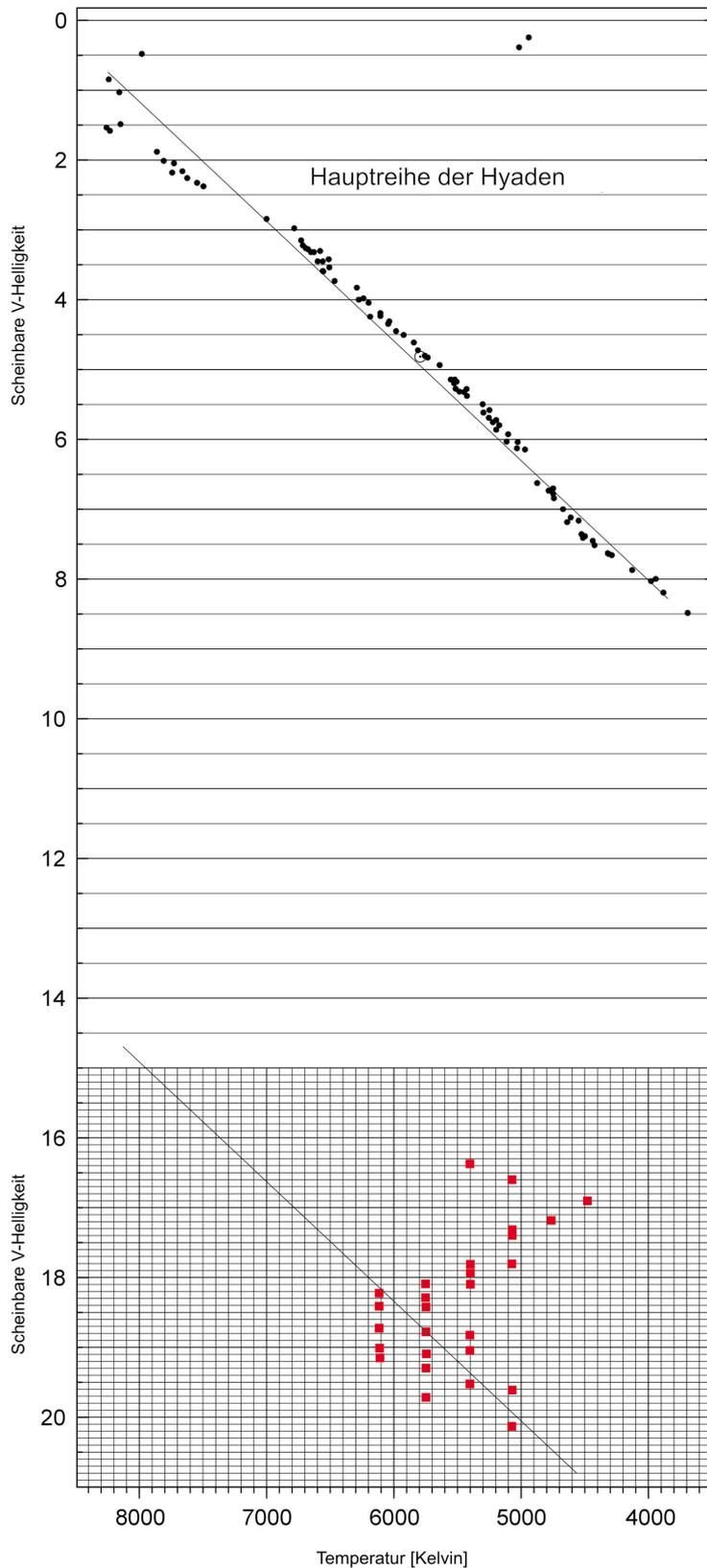
Für den Durchmesser des Clusters gibt Harris  $D_{cl} = 4,9$  kpc. Dieser Wert wurde unter Berücksichtigung einer interstellaren Extinktion von 0,57 Magnituden zwischen uns und M12 erhalten. In der Formel für die Entfernungsberechnung von M12 wird somit  $m - M = 5 \log_{10} D - 5 + 0,57$  eingesetzt.

Wir berechneten  $D = 10^{(m - M + 5)/5} = 10^{3,78} = \mathbf{6,026 \text{ kpc}}$  ohne die Korrektur der interstellaren Extinktion und  $D = 10^{(m - M - 0,57 + 5)/5} = 10^{3,666} = \mathbf{4,634 \text{ kpc}}$  unter Berücksichtigung der interstellaren Extinktion.

Für die nachfolgenden Berechnungen haben wir die extinktionskorrigierte Entfernung von 4,634 kpc verwendet.



## Anleitung Für den Lehrer



**Abbildung 3: Hertzsprung-Russel Diagramm von M12 und dem Sternhaufen der Hyaden**  
Der obere Teil des Diagramms zeigt das H-R Diagramm des Sternhaufens der Hyaden. Der untere Teil zeigt die Werte der Autoren für den Sternhaufen M12. Die Linien entsprechen jeweils der Interpolation der Sterne der Hauptreihe.



## Anleitung Für den Lehrer

### Task 14-16

In unseren Messungen hat ein Stern am Abknickpunkt eine scheinbare Helligkeit von 18.7. Wissenschaftler haben für den Abknickpunkt von M12 18.3 erhalten (Rosenberg et al.).

Wir berechnen nun

$$(L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}}) = (D_{\text{Haufen}}/D_{\text{Sonne}})^2 \cdot (I_{\text{Haufen}}/I_{\text{Sonne}})$$

Berechnung des Verhältnis ( $I_{\text{Haufen}}/I_{\text{Sonne}}$ ):

Da  $I_{\text{Sonne}}$  sehr viel größer ist als  $I_{\text{Haufen}}$ , wird das Verhältnis der beiden Werte eine sehr kleine Zahl ergeben. Wir empfehlen daher das Verhältnis  $I_{\text{Sonne}}/I_{\text{Haufen}}$  zu berechnen und anschließend den Kehrwert zu bilden und diesen Wert dann für die weiteren Berechnungen zu benutzen.

$$(I_{\text{Sonne}}/I_{\text{Haufen}}) = 10^{(m_{\text{Haufen}} - m_{\text{Sonne}})/2,5} = 10^{(18,7 - (-26,5))/2,5} = 10^{18,08} = 1,202 \times 10^{18}$$

so  $(I_{\text{Haufen}}/I_{\text{Sonne}}) = 8,318 \times 10^{-19}$

Weitere Rechnungen:

$$(D_{\text{Haufen}}/D_{\text{Sonne}}) = (4634 \times 3,086 \times 10^{13}) / 1,498 \times 10^8 = 9,559 \times 10^8$$

$$(L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}}) = (D_{\text{Haufen}}/D_{\text{Sonne}})^2 \times (I_{\text{Haufen}}/I_{\text{Sonne}}) = (9,559 \times 10^8)^2 \times 8,318 \times 10^{-19} = \mathbf{0,76}$$

$$(M_{\text{Haufen}}/M_{\text{Sonne}}) = (L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}})^{1/3,8} = \mathbf{0,93}$$

$$(t_{\text{Haufen}}/t_{\text{Sonne}}) = (M_{\text{Haufen}}/M_{\text{Sonne}})^{-2,8} = 1,224$$

$$t_{\text{Haufen}} = 1,224 \times t_{\text{Sonne}} = 1,224 \times 8,2 \times 10^9 = \mathbf{10 \times 10^9 \text{ Jahre}}$$

Es gibt eine alternative und auch etwas einfachere Möglichkeit das Alter des Sternhaufens zu bestimmen. Ihr Ursprung ist empirisch (auf Messungen stützend) und daher weniger intuitiv. Dabei wird folgende Gleichung verwendet:

$$M_V(T0) = 2,70 \log_{10} (t) + 1,41,$$

wobei  $M_V(T0)$  die absolute Helligkeit am Abknickpunkt ist und  $t$  das Alter des Sternhaufens in Milliarden Jahren.

Aus  $M_V(T0) = m_V(T0) - (m_V(T0) - M_V(T0)) = m_V(T0) - (m_V - M_V)$   
(Das Entfernungsmodul ist für den gesamten Sternhaufen gleich) erhalten wir:

$$m_V(T0) - (m_V - M_V) = 2,7 \log_{10} (t) + 1,41,$$

was umgeformt zu  $t = 10^{[(m_V(T0) - (m_V - M_V)) - 1,41] / 2,7}$  führt.



## Anleitung Für den Lehrer

Helligkeiten des Abknickpunkts, Entfernung und Alter (bestimmt durch die ursprünglich gezeigte und die alternative, oben beschriebene Methode) eines Sternhaufens aus verschiedenen Datenreihen: Die Werte in Fettdruck sind die besten Werte aus der Literatur.

Gemessene Helligkeit am Abknickpunkt [ $m_v$ ]	Berechnete Entfernung [pc]	Alter, Methode 1 [Milliarden Jahre]	Alter, Methode 2 [Milliarden Jahre]
18,7	4634	10,0	18,0
18,85	4634	11,1	20,5
18,5	4634	8,8	15,2
<b>18,3</b>	<b>4900</b>	7,0	11,6
18,3	4634	7,7	12,8
18,3	4500	8,0	13,5
18,7	6026 (ohne Extinktion)	6,8	18,0

Verschiedene Methoden zur Altersbestimmung eines Kugelsternhaufens sind von Chaboyer et al. beschrieben worden. Diese Forscher erhalten für das Alter von M12 Werte zwischen 11.5 und 15.9 Milliarden Jahre.

### Zusätzliche Aufgaben

#### Aufgabe 17

$$d = D_{\text{Haufen}} \cdot a = 4634 \times 3,833 \times 10^{-3} = \mathbf{17,76 \text{ pc}}$$

	cm	Grad	Bogenmaß
Gesamtbild	14,8	0,25	
Winkeldurchmesser, a	13,0	0,22	$3,833 \times 10^{-3}$

Der Sternhaufen endet dort, wo die Sterndichte den selben Wert wie der Hintergrund erreicht.

Der Wert des Winkeldurchmessers, a entspricht  $0,22 \times 60 = \mathbf{13,2 \text{ arcminutes}}$ . Bogenminuten. Im Uranometria 2000 Atlas findet man einen Winkeldurchmesser von 14,5 Bogenminuten.

#### Aufgabe 18

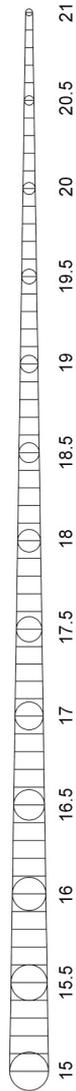
$$L_{\text{Haufen}}/L_{\text{Sonne}} = 2,512^{(M_{\text{Sonne}} - M_{\text{Haufen}})} = 2,512^{4,8 - (-7,32)} \sim \mathbf{70,500}$$

Die Gesamtanzahl an Sternen in M12 ist nach Carl Gillmair (SIRFT Science Center, Private Mitteilung, 2002) in etwa  $150,000 \pm 35,000$



## Anleitung Für den Lehrer

**Abbildung 4:  
Messschablone**  
Diese Schablone soll  
auf eine transparente  
Folie kopiert werden  
und wird für die  
Messungen in den  
Aufgaben 1 bis 6  
benötigt.





[www.astroex.org](http://www.astroex.org)

