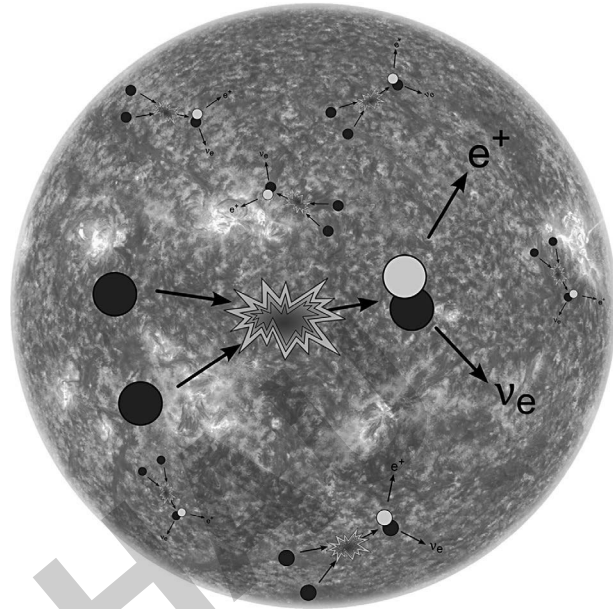


Wie lange lebt er? Mit dem HRD die Sternentwicklung untersuchen

Stefan Völker, Jena

In **Beitrag II/H, Reihe 3** haben Ihre Schüler gelernt, aus beobachtbaren Größen die physikalischen Eigenschaften (Zustandsgrößen) von Sternen zu ermitteln. Dabei lag der Fokus auf Hauptreihensternen¹. Die systematische Ordnung der Ergebnisse in einem **Hertzsprung-Russell-Diagramm** zeigt, dass neben den Hauptreihensternen auch weitere Entwicklungsstadien der Sterne existieren, und vervollständigt so das Bild.

Hier lernen Ihre Schüler, wie man mit Wissen von den aller kleinsten physikalischen Objekten Vorhersagen über die Physik der Sterne machen kann. Denn die Kernphysik bestimmt z. B. über die Lebensdauer eines Sterns.



© Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE and HMI science teams

Der 1. Schritt von H zu He: Zwei Protonen verschmelzen zu einem Deuteriumkern.

„Je größer die Masse,
umso geringer die
Lebenserwartung!“²

II/H

Der Beitrag im Überblick	
<p>Klasse: 12</p> <p>Dauer: ca. 3 Stunden</p> <p>Ihr Plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Materialien mit <u>authentischen</u> astronomischen Beobachtungsdaten ✓ Flexibel einsetzbarer Folienvorlagensatz zum Hertzsprung-Russell-Diagramm (M 2) 	<p>Inhalt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) • Lebensdauer eines Sterns • Empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung <p>Voraussetzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • II/H Reihe 3 „Wie man einen Stern auf die Waage legt – stellare Zustandsgrößen bestimmen“ auf CD-ROM 40

¹ vgl. M 4, Aufgabe 1

² Zitat nach Rudolf Kippenhahn (siehe Mediathek)

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit UG = Unterrichtsgespräch
 LEK = Lernerfolgskontrolle Fo = Folienvorlage

M 1 **Ab / UG** **Alltagsbeispiel – das Hertzsprung-Russell-Diagramm einführen**
 ⌚ D: 45 min Folie

M 2 **Fo** **Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)**
 ⌚ D: 45 min Folie
 Schere
 Foliestift

M 3 **Ab** **Die Lebensdauer eines Sterns**
 ⌚ D: 45 min Lineal
 Taschenrechner

M 4 **LEK** **Sind Sie fit? – Testen Sie Ihr Wissen!**
 ⌚ D: 45 min Taschenrechner

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 9.

Anmerkung

Der Teil I (II/H, Reihe 3) des Beitrages mit einem **Gruppenpuzzle** zur Bestimmung der Zustandsgrößen eines Sterns (Masse, Radius, Temperatur, Spektraltyp, Leuchtkraft) ist im EL 37, Nov. 2014 erschienen. Wenn Sie RAAbits Physik zu diesem Zeitpunkt noch nicht bezogen haben, finden Sie diesen Teil I im PDF-Format auf **CD-ROM 40**.

Die Lernerfolgskontrolle enthält Aufgaben, deren Beantwortung Wissen aus **beiden** Teilen voraussetzt.

Auf **CD-ROM 40** finden Sie außerdem ein umfangreiches **Quellenverzeichnis**.

Die **Mediathek** ist nur in Teil I enthalten, darin finden Sie auch Anregungen für Teil II.

M 1 Alltagsbeispiel – das Hertzsprung-Russell-Diagramm einführen³

Variante 1:

- Schreiben Sie anonym Ihre Körpergröße und Ihr Gewicht auf einen Zettel.
- Tragen Sie gemeinsam mit Ihren Mitschülern alle Datenpunkte in das Diagramm ein (Abbildung M1-1).
- Kopieren Sie ein Diagramm auf Folie.

Variante 2:

- Befragen Sie Ihre Familie (Geschwister, Eltern, Großeltern usw.) nach Körpergröße und Gewicht.
- Tragen Sie gemeinsam mit Ihren Mitschülern alle Datenpunkte in das Diagramm ein (Abbildung M1-1).
- Kopieren Sie ein Diagramm auf Folie.

Tip

Tragen Sie Ihre Werte gleich in eine gemeinsame **Excel-Tabelle** ein. Zeichnen Sie mit Excel ein Diagramm, das dem aus Abbildung M1-1 entspricht, und projizieren Sie es mit einem Beamer für alle sichtbar an die Wand.

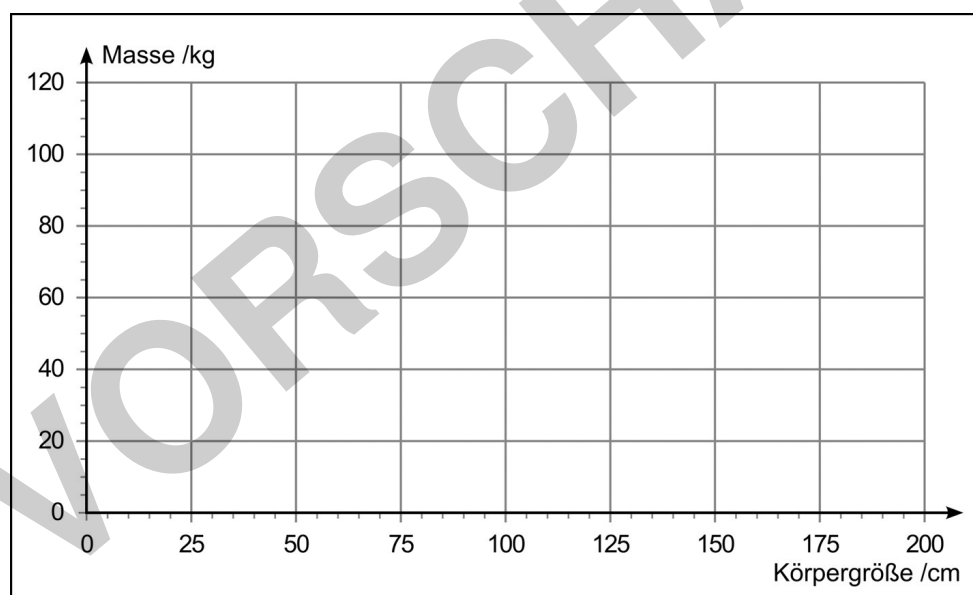


Abbildung M1-1: Zustandsdiagramm der beiden menschlichen Grundeigenschaften Masse und Körpergröße

Fragen zur Interpretation des Diagramms

- ? Sind die Punkte im Diagramm zufällig verteilt oder fallen Häufungsgebiete auf?
- ? Wie lassen sich eventuelle Häufungsgebiete entlang von Geraden erklären?
- ? Warum sind im Bereich der Erwachsenen deutlich mehr Punkte vorhanden, als im Bereich der Säuglinge? Warum ist dort die Besetzungsdichte höher? (nur bei Variante 2)
- ? Welche Zustandsgrößen eines Sterns sind ähnlich grundlegend und einfach zu bestimmen wie Masse und Körpergröße eines Menschen?

³ [Schatz 1967], [Schwarz 2013] siehe CD-ROM 40

M 4 Sind Sie fit? – Testen Sie Ihr Wissen!

Name: _____

Datum: _____

Aufgaben

- Definieren Sie: Was ist ein Hauptreihenstern?
- Beschreiben Sie die Bestimmung von **einer** der Zustandsgrößen Masse, Radius, Temperatur oder Leuchtkraft eines Sterns. Nennen Sie die notwendigen Beobachtungsgrößen und erläutern Sie deren Auswertung.
- Das Hertzsprung-Russell-Diagramm:
Abbildung **M 4-1** zeigt das HRD für Sterne der Milchstraße mit Entfernungen $d < 121$ pc.
 - Zeichnen Sie in dieses Diagramm den Verlauf der Hauptreihe, das Gebiet der Riesensterne und das Gebiet der Weißen Zwerge ein.
 - Zeichnen Sie in dieses Diagramm die Position der Sonne ein ($T_{\text{eff}, \odot} = 5777$ K).
 - Erklären Sie, warum Riesensterne im Vergleich zu Hauptreihensternen gleicher Temperatur deutlich größere Leuchtkräfte haben und warum Weiße Zwerge geringere Leuchtkräfte als Hauptreihensterne mit gleicher Temperatur haben.
- Der Stern Wega (α Lyr) ist der hellste Stern im Sternbild Leier. Seine Position im HRD ist in Abbildung M 4-1 eingezeichnet.
 - Beschreiben Sie, wie es möglich ist, die Masse von Wega zu bestimmen, obwohl Wega kein Mitglied eines Doppelsternsystems ist.
 - Berechnen Sie die Masse von Wega in Einheiten der Sonnenmasse.

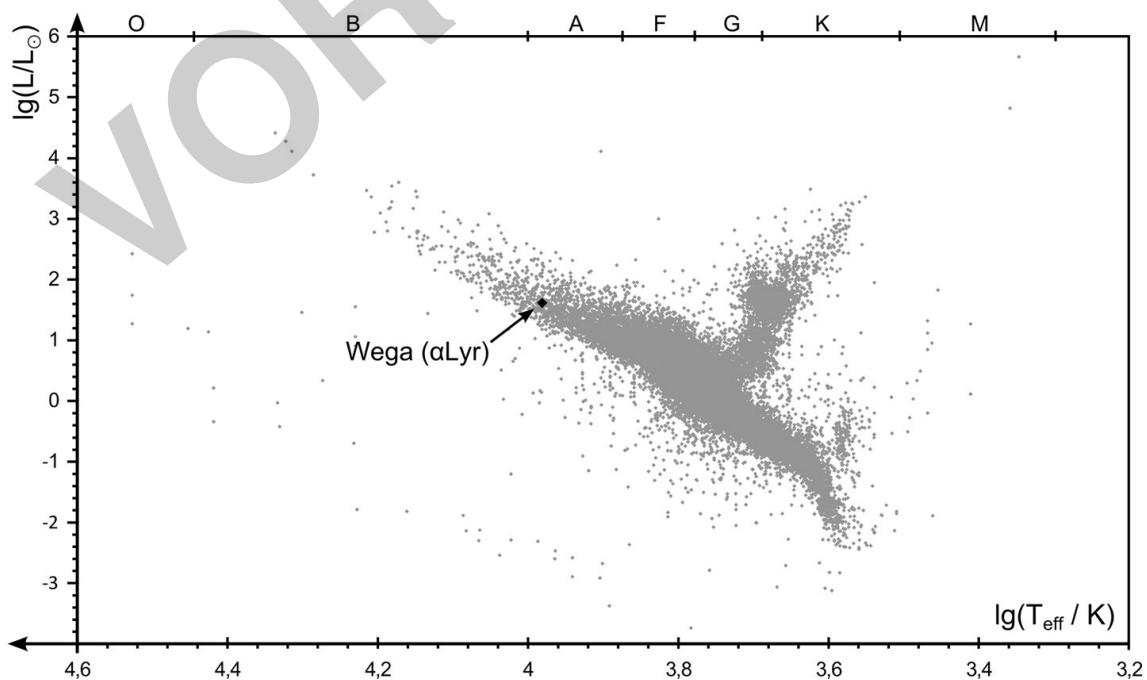


Abbildung M 4-1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit Wega

II/H

Zu Folie 4:

Legen Sie Folie 4 erst nach der Bearbeitung des Materials **M 3** auf! Folie 4 zeigt zwei Sternenhaufen. Der links dargestellte offene Sternhaufen **h+χ Persei** enthält sehr viele heiße Sterne, von denen sich ein Großteil noch auf der Hauptreihe befindet. Nur die sehr heißen B- und die O-Sterne haben sich bereits von der Hauptreihe entfernt. Kühle und leuchtschwache Sterne fehlen im HRD von h+χ Persei. Die Hauptreihe scheint nach unten hin abgeschnitten. Dies ist wieder ein Auswahleffekt. Die leuchtschwachen Sterne können aufgrund der großen Entfernungen nicht detektiert werden.

Der Sternhaufen 47 Tuc (rechts dargestellt) dagegen zeigt ein völlig anderes Bild. Im HRD von 47 Tuc sind keine Sterne heißer als A-Sterne auf der Hauptreihe enthalten, dafür deutlich mehr Sterne im Bereich der Riesensterne. Die massereichen Sterne haben die Hauptreihe bereits verlassen und sich in das Gebiet der Riesensterne entwickelt. Auch 47 Tuc besitzt eine nach unten abgeschnittene Hauptreihe, die sich wie oben bereits geschildert begründen lässt.

In Folie 4 ist schematisch der **Entwicklungsweg der Sonne** eingezeichnet. Am Ende der Hauptreihenphase entwickelt sich die Sonne zunächst in Richtung geringer Temperaturen und hoher Leuchtkraft, d. h., die Sonne muss ihren Radius vergrößern. Sie wandert in das Gebiet der Riesen. Während sich die äußere Schale der Sonne aufbläht, kontrahiert der Helium-Kern (entstanden durch das H-Brennen) in ihrem Innern. Dabei steigen Druck und Temperatur, bis das zentrale He-Brennen ($3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C}$) einsetzt. Erlischt schließlich auch das He-Brennen, stößt der Stern seine äußere Hülle ab, der heiße Kohlenstoffkern kühlt ab, wird immer leuchtschwächer und endet als Weißer Zwerg. Die Nach-Hauptreihenentwicklung ist jedoch stark davon abhängig, welche Masse der Hauptreihenstern hat.

Folie 4 enthält zudem eine Einteilung der Hauptreihe in verschiedene Massebereiche. Diese wurden mit der in Material **M 3** abgeleiteten **Masse-Leuchtkraft-Beziehung** berechnet. Ebenfalls mit den in **M 3** gewonnenen Beziehungen kann die Lebensdauer eines Sterns auf der Hauptreihe berechnet werden. Allgemein gilt, dass die Lebensdauer eines Sterns umso kürzer ist, je größer seine Masse ist. Massereiche Sterne entwickeln sich also früher in das Gebiet der Riesen. Mit diesem Wissen kann man aus dem HRD eines Sternhaufens dessen Alter bestimmen. Hierzu ermittelt man die Leuchtkraft der Sterne, die sich gerade noch auf der Hauptreihe befinden, also die Lage des Abknickpunktes. Über die Leuchtkraft des Abknickpunktes kann die zugehörige Masse und, dazu passend, die Verweildauer auf der Hauptreihe berechnet werden. Diese entspricht dem Alter des Sternhaufens. Wäre der Sternhaufen jünger, müssten noch massereichere (leuchtkräftigere) Sterne auf der Hauptreihe sein. Wäre der Sternhaufen älter, müssten sich schon masseärmere (leuchtschwächere) Sterne von der Hauptreihe weg entwickelt haben.

Bei 47 Tuc liegt der Abknickpunkt etwa bei $\lg(L/L_{\odot}) \approx 0$ oder $L_{\text{Knick}} = 1 \cdot L_{\odot}$. Daraus ergibt sich die Masse $m_{\text{Knick}} \approx 1 \cdot m_{\odot}$ und ein Alter von $t = 1 \cdot t_{L_{\odot}} = 7 \cdot 10^9$ Jahre. Trotz der groben Abschätzungen liegt dieser Wert nahe am veröffentlichten Wert von $12,5 \cdot 10^9$ Jahre [Carretta 2000].

M 3 Die Lebensdauer eines Sterns

1. Die Lebensdauer der Sonne:

- Aus Tabelle M 3-1 liest man die Massen der Reaktionsprodukte und -edukte ab. Der relative Massenverlust ist

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{Edukte}}} = \frac{(4 \cdot m_{\text{p}^+} + 2 \cdot m_{\text{e}^-}) - (m_{\text{He}} - 2 \cdot m_{\text{e}^-})}{4 \cdot m_{\text{p}^+} + 2 \cdot m_{\text{e}^-}} = \frac{4,7544 \cdot 10^{-29} \text{ kg}}{6,6922 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 7,104 \cdot 10^{-3} \approx 0,7 \%$$

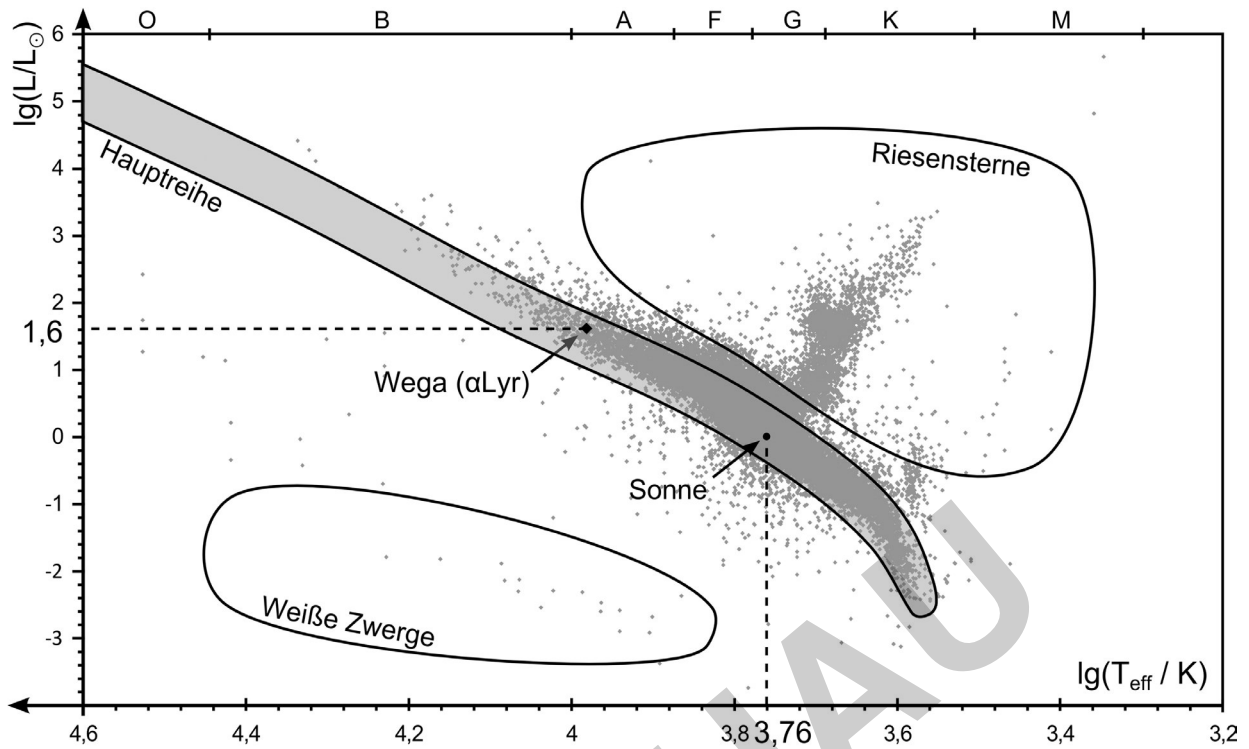


Abbildung L 4-1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit Lösung [HIPPARCOS]

II/H