

Das Hertzsprung-Russel-Diagramm - eine mehr als 100 Jahre alte Darstellung im Dienste der modernen Astronomie

Bezug zum Beitrag „Gaia funktioniert – ein erster Blick auf die Daten“ in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“, 10/2015, S. 12

Thomas Jahre, Lehrer am Chemnitzer Schulmodell – www.schulmodell.eu

Die Gaia-Mission der ESA soll eine hochpräzise Durchmusterung des Sternhimmels ausführen. Es sollen während der Missionsdauer von 5 Jahren (2013 – 2018) rund eine Milliarde Sterne unserer Milchstraße photometrisch, spektroskopisch und astrometrisch erfasst werden. Eine der Methoden zur Datenauswertung besteht in der Verwendung von Hertzsprung-Russel-Diagrammen.

Nachfolgend wird beschrieben, welche Diagrammformen (Achsenvarianten) es gibt und natürlich, wie so ein **Hertzsprung-Russel-Diagramm (HRD)** aufgebaut ist. Auch welche direkten und indirekten Informationen einem solchen Diagramm entnommen werden können, soll in dem Beitrag dargestellt werden.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sterne	Eigenschaften von Sternen: Farbe, Temperatur, Größe, Alter von Sternen, Definition und Zusammenhang von relativer und absoluter Helligkeit
Fächerverknüpfung	Astronomie - Mathematik Astronomie - Statistik Astronomie - Philosophie	Koordinatensysteme: lineare und logarithmische Achseneinteilungen Daten: Erfassung, Auswertung und Deutung, Denkmodelle
Lehre allgemein	Übertragung von Wissen von einem Fach zum anderen, Unterrichtsmittel	„Mathematik ist überall“ Schüleraufträge

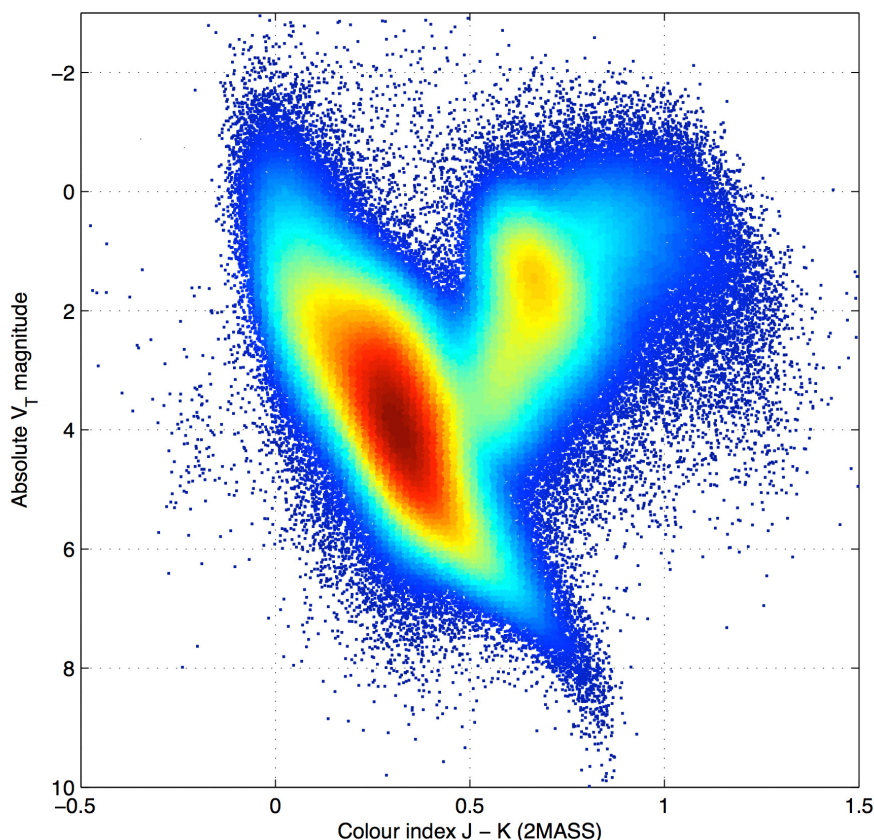


Abbildung 1:
Fast eine Million Sterne
in einem HRD erfasst.
Quelle:
http://www.esa.int/spaceimages/Images/2015/08/Gaia_s_first_Hertzsprung-Russell_diagram

Das Hertzsprung-Russel-Diagramm (kurz HRD) basiert auf theoretischen Vorarbeiten des dänischen Astronomen Ejnar Hertzsprung, der seine Erkenntnisse aber nicht in einer graphischen Form präsentierte. Im Jahr 1913 stellte Henry Norris Russel ein Diagramm vor, in dem die Beobachtungsgrößen Farbe und (absolute) Helligkeit zusammen gebracht wurden. Diese Darstellung von Daten führte zu dem in der Astronomie wahrscheinlich am häufigsten genutzten Diagramm. Den Namen erhielt das Diagramm vom dänischen Astronomen Bengt Strömgren im Jahre 1933.

Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) studierte Chemie in Kopenhagen und arbeitete danach als Chemiker für drei Jahre in St. Petersburg. Nach photochemischen Studien bei Wilhelm Ostwald in Leipzig im Jahre 1901 widmete er sich seiner eigentlichen Leidenschaft, der Astronomie. Vielleicht war es der Kontakt zur Photometrie, der ihn dazu brachte, im Jahre 1905 die absolute Helligkeit als Maß für die Leuchtkraft der Sterne zu definieren. 1909 stellte Hertzsprung fest, dass es für viele Sterne einen Zusammenhang zwischen Spektralklasse und Leuchtkraft gibt. Eine weitere wichtige Entdeckung war, dass es Riesensterne und Zwergsterne mit gleicher Oberflächentemperatur (aber unterschiedlicher Leuchtkraft) gibt.

Eine graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spektraltyp und absoluter Helligkeit wurde von Hertzsprung nicht erstellt. Dies blieb dem amerikanischen Astronomen Henry Norris Russel (1877 – 1957) vorbehalten, der es in modifizierter Form 1913 auf einer Tagung der Royal Astronomical Society vorstellte. Russel entwarf das Diagramm, welches später zum HRD wurde, mit den Achsen Farbe und absolute Helligkeit. Von den in der Abb. 5 gezeigten 4 Achsen sind bei Russel nur die linke und untere Skala zu finden - im Prinzip eine typische Diagrammform mit „x-Achse“ und „y-Achse“.

Die Farben oder Spektralklassen lassen sich Oberflächentemperaturen zuordnen. Den Zusammenhang zwischen Farbe und Temperatur kann man mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz erklären. Daher ist in Abbildung 5 oben die Temperaturachse hinzugekommen. Eine solche Zuordnung ist auch zwischen absoluter Helligkeit und Leuchtkraft leicht zu bewerkstelligen. Das führt zu der sich rechts befindenden Leuchtkraftachse.

Diese 4 Achsen sind meist auf älteren Darstellungen zu finden. Zum Beispiel auf der Rolltafel HRD, die im Astronomieunterricht in der DDR verwendet wurde. Welche Achsenvarianten benutzt werden, hängt meist von der angestrebten Verwendung ab, wobei das Eintragen von Punkten bei kartesischer – linear geteilter – Achse natürlich einfacher vorzunehmen ist, so dass die Eintragung nach gemäß der Achse der absoluten Helligkeit bevorzugt wird. Von den sich auseinander ergebenden Achsenpaaren (Leuchtkraft – absolute Helligkeit bzw. Spektraltyp/Farbe – Oberflächentemperatur) werden in Abb. 1 nur die absolute Helligkeit und Farbe verwendet.

Auf Russel geht auch zurück, Sternbilder kurz mit drei aus dem lateinischen Namen abgeleiteten Buchstaben zu benennen. Auch wichtig zu nennen ist seine Arbeit über die Zusammensetzung der Sterne. Während er 1925 noch die bahnbrechende Entdeckung Cecilia Paynes, der zufolge Sterne überwiegend aus Wasserstoff und Helium bestehen, vehement zurückwies, bestätigten seine Untersuchungen im Jahr 1929 aber die Entdeckungen Paynes. Russel konnte für die Sonne das Verhältnis von Wasserstoff zu Helium mit 3:1 bestimmen. Darauf aufbauend entwickelte George A. Gamow die Theorie der Kernfusion als Energiegewinnungsprozess in Sternen.

Schüleraufträge

Wie entstand das HRD – Geschichte und Vorgeschichte

- Stelle die Biographien von Hertzsprung, Russel, Cecilia Payne und Gamow vor! (lässt sich auf mehrere Schüler verteilen)
- Stelle den Anteil von Frauen an der Entwicklung der astronomischen Forschung dar. Nutze dafür die Biographien von Maria Cunitz, Caroline Herschel, Maria Mitchell und Antonia Maury! Es dürfen auch weitere Astronominnen einbezogen werden.

Die Achsen eines Diagramms

Schüler der Sekundarstufe 1 lernen in Mathematik, aber auch in Physik, Chemie usw. meist nur zweidimensionale Koordinatensysteme bzw. Diagramme kennen, die einen kartesischen Aufbau aufweisen. Die Achsen stehen senkrecht zueinander. Die Achseneinteilung ist für jede Achse so festgelegt, dass die „Einheitsstrecke“ für jede Achse durchgängig gilt (Abb. 2 links). Die Einteilung auf den Achsen kann dabei jeweils eine andere sein (Abb. 2 rechts).

Gerade in der Physik sind verschiedene Einteilungen der Achsen sinnvoll, um eine optimale Größe des Diagramms zu erhalten und um den verschiedenen physikalischen Größen (Zeit, Weg, Geschwindigkeit, ...) gerecht zu werden.

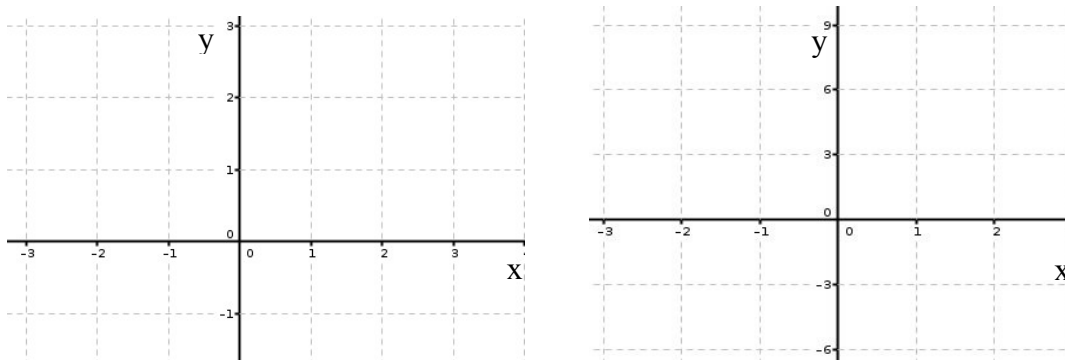


Abbildung 2: Kartesische Koordinatensysteme mit linearen Achsteilungen: links sind x- und y-Achse gleich geteilt, rechts nicht (Quelle: mit geogebra erstellt vom Autor).

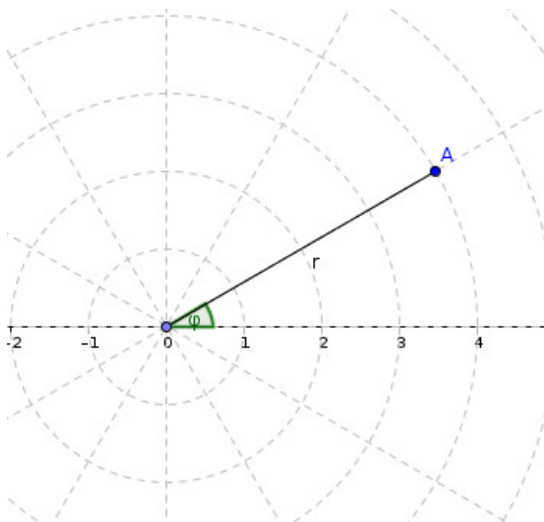


Abbildung 3: Polarkoordinatensystem (Quelle: mit geogebra erstellt vom Autor)

Ein weiteres Diagramm (Abb. 3) nutzt für die Darstellung von Daten die Polarkoordinaten r – den Abstand vom Koordinatenursprung und φ – den Winkel gegen die „x-Achse“. Diese Koordinaten werden in der Sekundarstufe 1 ebenfalls nicht vermittelt, obwohl sich eine Reihe von mathematischen Kurven leicht beschreiben ließen.

Wird in einem kartesischen System die x-Achse zur φ -Achse und die y-Achse zur r-Achse, so erhält man ein kartesisches φ -r-Koordinatensystem.

Polarkoordinaten werden in der Astronomie zum Beispiel zur Darstellung astronomischer Koordinatensysteme wie dem Horizont- oder Äquatorsystem genutzt.

Das HRD lässt sich nicht sinnvoll in einem Polarkoordinatensystem darstellen.

Schüleraufträge

- Warum ist es nicht sinnvoll, die im HRD aufgeführten Zustandsgrößen der Sterne in Polarkoordinaten abzutragen? (In welchem Falle wäre es günstig?)
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen kartesischen Koordinaten und Polarkoordinaten?
- Stelle lineare und quadratische Funktionen in Polarkoordinaten dar.

Im kartesischen Koordinatensystem gilt: Haben zwei Punkte auf einer Achse den gleichen Abstand, so ist die **Differenz** zwischen den Punkten immer gleich. Das heißt zum Beispiel, sind zwei Punkte auf einer nach oben verlaufenden Achse 5 cm voneinander entfernt, dann ist der dargestellte Unterschied immer derselbe, egal ob man sich oben oder unten auf der Achse befindet.

Sind nun zum Beispiel die Messwerte einer Messreihe sehr unterschiedlich groß, ergibt sich ein Problem. Legt man die Achseneinteilung der y-Achse nach dem größten Messwert fest, dann sind die kleinen Messwerte gar nicht mehr erkennbar. Will man aber die kleinen Messwerte verdeutlichen, so müsste die y-Achse sehr lang sein. Hier hilft nun eine **logarithmische Skala**.

In vielen Bundesländern kommt der Logarithmus in der Sekundarstufe 1 kaum vor. Dabei ist das gar nicht so schwer und für eine vollständige Erfassung von Potenzen eher notwendig. Der grundlegende Potenzbegriff betrifft die Multiplikation gleicher Faktoren, wofür eine abkürzende Schreibweise genutzt wird: $4 \cdot 4 \cdot 4 = 4^3$. Dieser Ausdruck wird Potenz genannt. Die 4 ist die Basis und die 3 wird als Exponent bezeichnet. Das Ergebnis der Multiplikation ist dann der Wert der Potenz: $4^3 = 64$.

Es sind also drei Zahlen miteinander verknüpft. Daraus ergeben sich drei Aufgabentypen. Zwei der Zahlen sind bekannt und die dritte soll ermittelt werden. In der ersten Zeile stehen diese Aufgabentypen. Welchen Wert hat die Potenz 3^5 ? Für welche Basis hat die fünfte Potenz den Wert 243. Und schließlich: Wie oft muss die 3 mit sich multipliziert werden, um den Potenzwert 243 zu erhalten?

$$\begin{aligned} 3^5 &= x & x^5 &= 243 & 3^x &= 243 \\ x &= 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 243 \\ x &= \sqrt[5]{243} = 3 \\ x &= \log_3 243 = 5 \end{aligned}$$

Die erste Aufgabe ($3^5 = x$) ist eine typische Aufgabe, die durchaus auch in der Primarstufe besprochen wird. Der zweite Aufgabentyp – jedoch mit dem Exponenten 2 oder 3 – wird vielfach in der Geometrie genutzt, so bei Berechnungen mit dem Satz des Pythagoras. Mit der Erweiterung des Potenzbegriffes auf Exponenten ist es möglich auch Aufgabentypen der Form $a^x = c$ zu lösen (indem man logarithmiert).

Mit dem Logarithmus erhält man eine neue Möglichkeit der Achseinteilung.

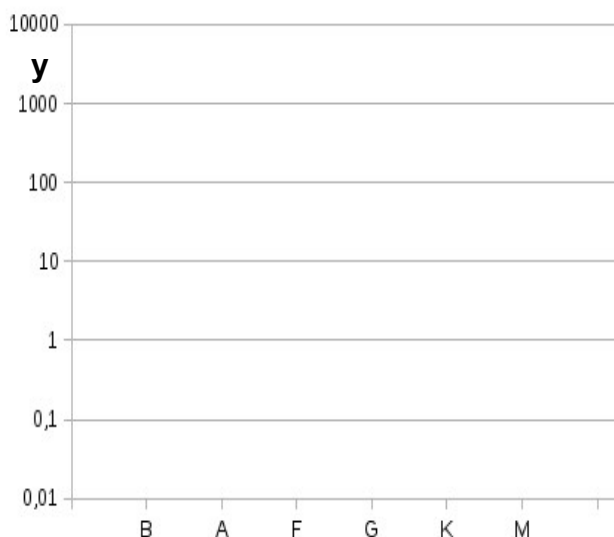


Abbildung 4: Diagramm mit logarithmisch geteilter y-Achse.
(Quelle: mit Libreoffice erstellt vom Autor)

Die Definition für eine logarithmische Skala (wie die y-Achse in Abb. 4) ist: Haben zwei Punkte auf einer Achse den gleichen Abstand, so ist das **Verhältnis (der Quotient)** zwischen den Punkten gleich.

Würden nicht die Werte an die Achse geschrieben, sondern deren Logarithmen, dann ergäbe sich für Abb. 4 bei Verwendung des dekadischen Logarithmus (Basis ist 10) von oben nach unten eine 4 (anstatt 10000), eine 3 (anstatt 1000) eine 2 (anstatt 100) eine 1 (anstatt 10), eine 0 (anstatt 1), eine -1 (anstatt 0,1) und eine -2 (anstatt 0,01).

Natürlich können auch beide Achsen logarithmisch geteilt sein.

Schülerauftrag

- Erkundige dich bei deinem Informatiklehrer sowie den Eltern oder Großeltern, wie ein Rechenstab aufgebaut ist und wie man damit rechnet.

Zum Aufbau des HRD

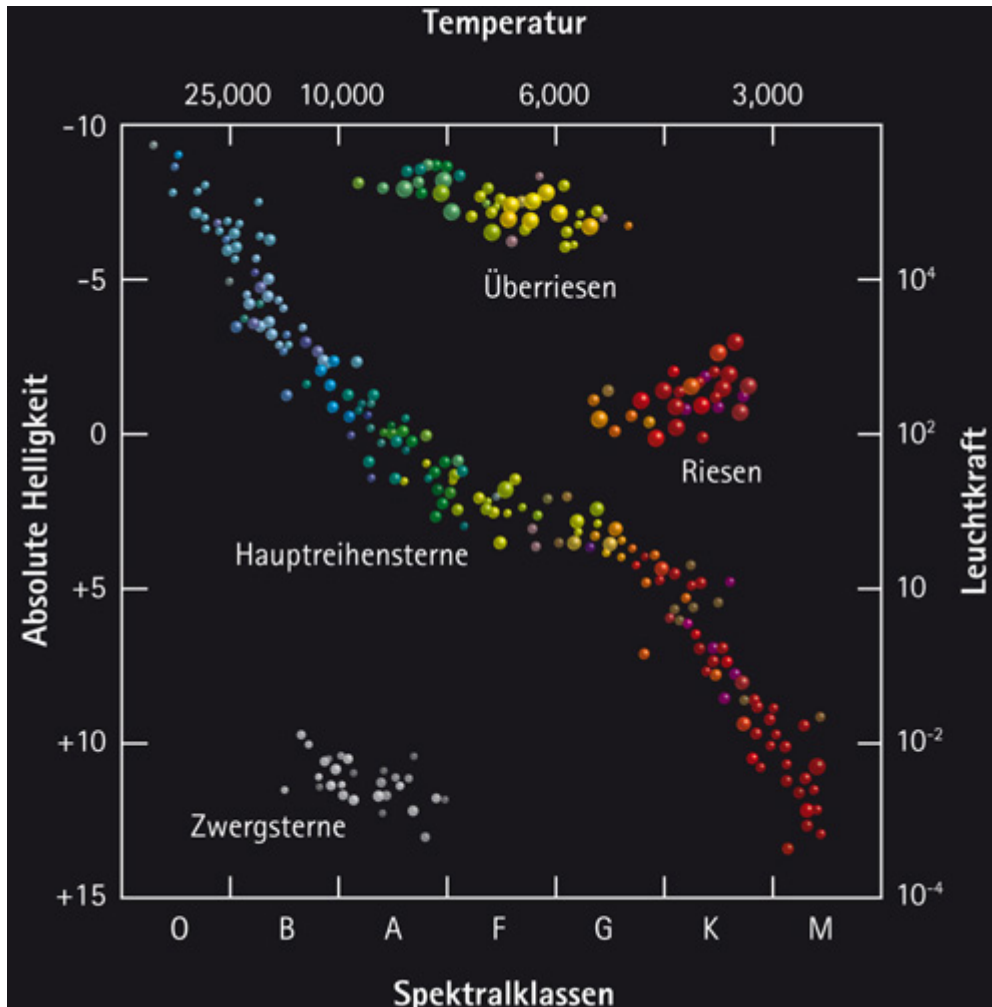


Abbildung 5: HRD mit zwei linear und zwei logarithmisch geteilten Achsen.
(Quelle: <http://vignette1.wikia.nocookie.net/astronomie-nwt-klasse-10a-des-whg/images/1/17/Diagramm.jpg>)

Die Achse auf der rechten Seite des HRD (Leuchtkraft, siehe Abb. 5) ist logarithmisch geteilt. Die ihr entsprechende Achse mit der absoluten Helligkeit ist kartesisch geteilt und ermöglicht so ein einfaches Eintragen von Werten durch die Schüler. Der Achsvergleich ermöglicht auch aufzuzeigen, dass einem Helligkeitsunterschied von 5 zwischen zwei Sternen ein Leuchtkraftverhältnis von 100 entspricht. Die untere Skala ist klassisch nach im Sinne des ersten Russell-Diagramms eingeteilt. Die Spektralklassen sind im gleichen Abstand eingetragen. Dadurch entsteht oben, durch den Zusammenhang von Spektralklasse und Oberflächentemperatur, eine Temperaturskala, welche keine reine Logarithmusskala ist. In Abb. 6 ist auch die Temperaturskala logarithmisch.

Schüleraufträge

- Wichtige Entfernungseinheiten in der Astronomie sind Lichtjahr und Parsec. Wie viele km sind das jeweils?
- Informiere dich über die Begriffe scheinbare und absolute Helligkeit.
- Berechne die absolute Helligkeit unserer Sonne, deren scheinbare Helligkeit $-26,73$ beträgt.
- Informiere dich auf den Seiten der ESA über die Gaia-Mission.

Trägt man die Daten vieler Sterne ein (Abbn. 5 und 6), so erkennt man schnell, dass sich die meisten Sterne in einem Bereich befinden, der von links oben nach rechts unten reicht. Dieser wird Hauptreihe genannt. Desweiteren gibt es Häufungsgebiete oberhalb der Hauptreihe (Riesen) und unterhalb der Hauptreihe (Zwerge).

Wie man aus dem HRD ersieht, haben einige der Sterne die gleiche Temperatur, aber eine deutlich unterschiedliche Leuchtkraft. Das führt zu einer der indirekt ableitbaren Aussagen. Haben zwei Sterne die gleiche Oberflächentemperatur, so muss der mit der größeren Leuchtkraft einen größeren Radius besitzen. Das führt dann auf die Zuordnung von Sternen zu den Riesen und Zwergen – so wie es Hertzsprung zu Beginn des letzten Jahrhunderts schon herausgefunden hatte.

Ein weiteres Forschungsergebnis von Hertzsprung besagt, dass die Masse der Sterne der Hauptreihe von oben nach unten abnimmt. Der Ort eines Sterns im HRD ändert sich in seinem Sternenleben. Er startet in der Hauptreihe, verweilt dort die meiste Zeit und wird irgendwann zum Riesen. Die Lebensdauer eines Sternes hängt wesentlich von seiner Masse ab. Je größer die Masse, desto kürzer die Lebensdauer (siehe Abb. 6). Man kann also aus dem Aussehen eines HRD auch Schlüsse über das Alter eines Sternhaufens ziehen. Ist die Hauptreihe stark ausgeprägt, dann ist es eher ein junger Sternhaufen. Gibt es dagegen den oberen Teil der Hauptreihe nicht (mehr), dann ist es eher ein alter Sternhaufen. Natürlich müssen weitere Untersuchungen gemacht werden, um solche Aussagen zu verifizieren.

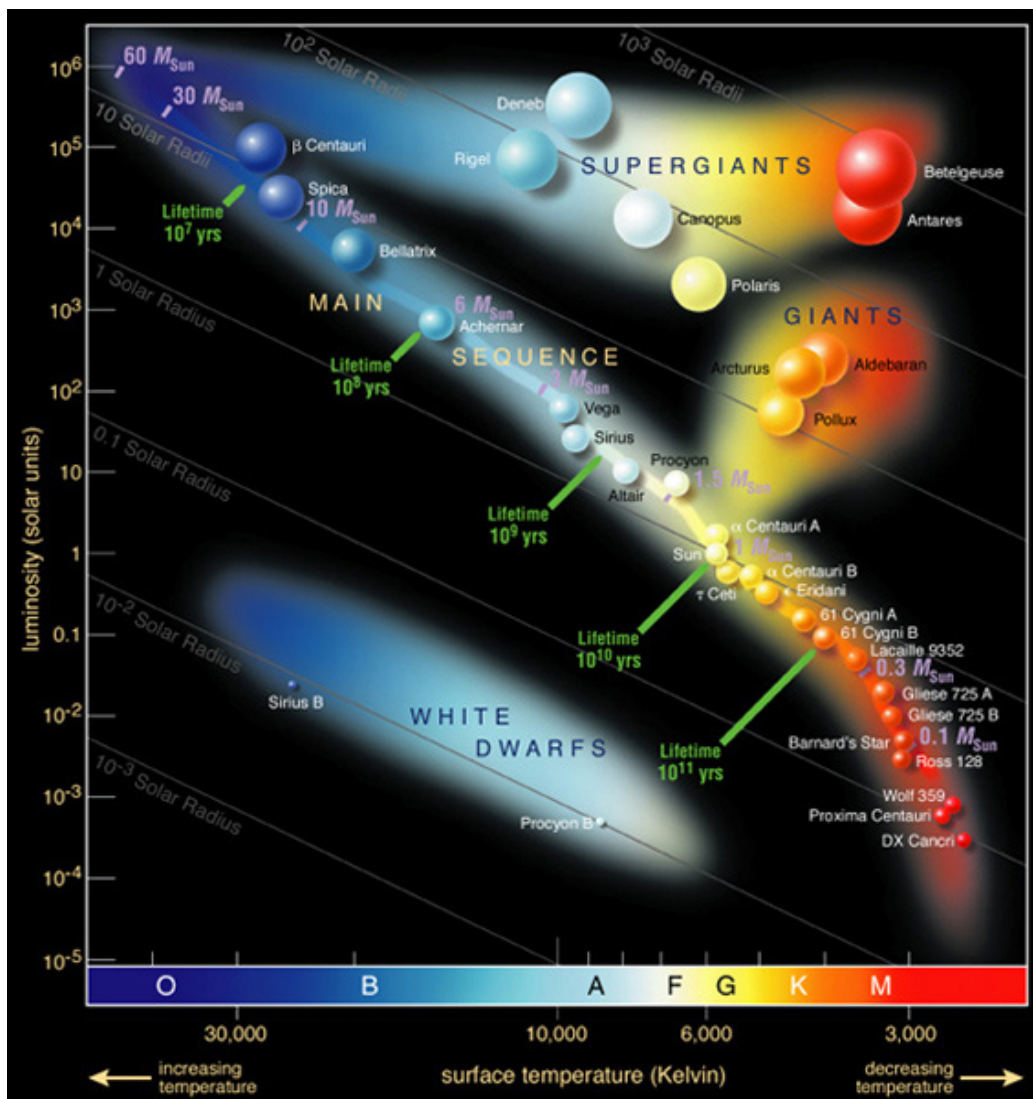


Abbildung 6: HRD mit Zusatzinformationen: Sternnamen sowie Massen- und Altersangaben für die Hauptreihensterne (Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Hertzsprung-Russel_StarData.png). Anmerkung: Würde man für die linke Achse eine kartesische Skala verwenden und z. B. bei 10 cm den Wert 10^5 Sonnenleuchtkräfte verwenden, dann würden gerade mal 7 der Sterne einen Abstand zwischen 1 und 10 cm von der Temperaturachse haben. Alle anderen hätten einen Abstand von weniger als 1 cm, die meisten sogar weniger als 0,1 mm.

Bei der Gaia-Mission werden rund eine Milliarde Sterne unserer Galaxis vermessen, woraus das bisher am stärksten gefüllteste HRD erstellbar sein wird. Man darf gespannt sein, zu welchen Ergebnissen dies noch führen wird.

Dieser Artikel regt den geneigten Leser hoffentlich an, sich mit astronomischen Themen oder auch dem Nutzen verschiedener Diagrammtypen zu befassen.

Thomas Jahre

Literaturhinweis:

Dieter B. Herrmann Astronomie Geschichte – Paetec-Verlag ISBN 3-89518-346-7 bzw. Sterne und Weltraum 29 (1990)