Was ist ein Stern?
Die Eigenschaften der Sterne auf die Spur

Autorin: Dr. Cecilia Scorza

Materialien geeignet für die Klassenstufen 10.-12/13.

(Credit: ESO)

1. Die Zustandsgrößen der Sterne

Wenn wir die Sterne des Sternbildes Orion (siehe rechts Abb. 1) genau betrachten, können wir feststellen, dass die Sterne unterschiedliche Farben und unterschiedliche Helligkeiten haben. Um zu verstehen, warum dies so ist, müssen wir uns zuerst mit dem Aufbau und der Energiequelle der Sterne beschäftigen. Was ist überhaupt ein Stern? Und woher kommt seine Energie?

Abb. 1: Sternbild Orion (Credit Mauser)

Sterne sind gigantische Kugeln aus heißem Gas, die ihre Energie selbst erzeugen und ausstrahlen. Ein Stern ist so massereich, dass sein Kern extrem dicht und heiß ist.

Die riesigen Gasmengen in einem Stern, vor allem Wasserstoff und Helium, werden durch die Schwerkraft zusammengehalten.

Sterne existieren aufgrund des Gleichgewichts zweier Kräfte: Zwischen der Schwerkraft, die auf die Massen der Teilchen wirkt, und dem Gasdruck. *Dieses Gleichgewicht nennt man hydrostatisches Gleichgewicht.*

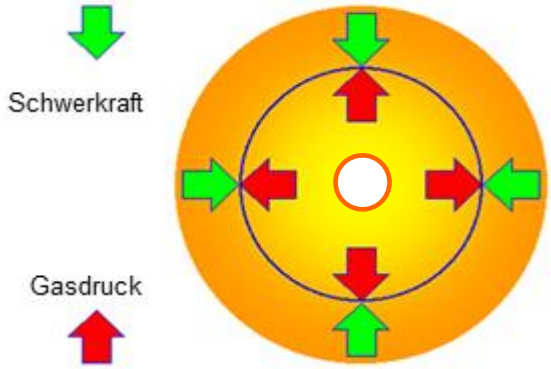

Abbildung 2: Wirkende Kräfte in einem Stern: Die Schwerkraft presst den Stern zusammen, während der Gasdruck ihn auseinander drückt (Credit: Scorza)

Aktivität 1:
Eine kurze Gruppendiskussion

Was würde mit einem Stern geschehen, wenn:

(a) … die Schwerkraft plötzlich verschwindet?

(b) … und **w**enn der Gasdruck nachlässt?

Die Temperatur im Kern eines sonnenähnlichen Sterns beträgt 15 Mio. K. Bei diesen hohen Temperaturen bewegen sich die Wasserstoffkerne (die nur aus einem Proton bestehen) extrem schnell und können miteinander kollidieren. Wenn dies passiert, bilden sie massereichere Kerne (z. B. Wasserstoffkerne mit einem Proton und einem Neutron – Deuterium), wobei eine große Menge an Energie freigesetzt wird. *Dieser Vorgang wird Kernfusion genannt.*

In einem Stern wie der Sonne fusionieren vier Wasserstoffkerne (oder vier Protonen) in mehreren Schritten zu einem Heliumkern, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Der Heliumkern ist erstaunlicherweise leichter als zwei Protonen und zwei Neutronen zusammen: Er besitzt nur 99,3 % der gesamten Masse dieser vier Teilchen zusammen. Wir wissen heute, dass während des Fusionsvorgangs etwa 0,7 % der

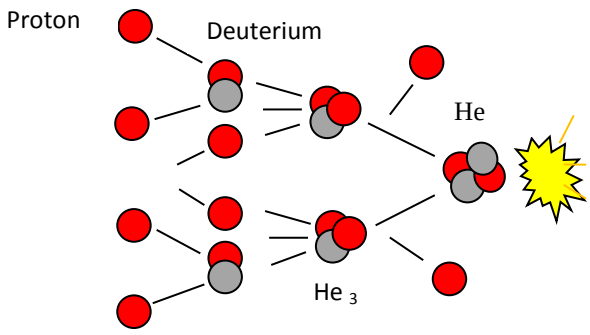

Abbildung 3: Fusionsprozess in der Sonne (Credit: Scorza)

Gesamtmasse von zwei Protonen und zwei Neutronen entsprechend der Einstein'schen Formel $E = m\,c^2$ in Energie umgewandelt wird.

Dies bedeutet, dass die Sterne das Material, aus dem sie bestehen (am Anfang Wasserstoff und Helium), als Brennstoff für die Energieerzeugung verbrauchen. Sie wandeln es über einen „Verbrennungsprozess" (Fusion) in schwerere Elemente um. So entstehen aus:

Wasserstoff → Helium; aus Helium → Kohlenstoff; aus Kohlenstoff →Stickstoff und so weiter.

Das ist die Reaktionskette der Kernfusion, die bei jedem Schritt Energie liefert und das Leben der Sterne antreibt. Dies bedeutet zugleich, dass alle Elemente, die man in der Natur und in unserem Körper findet und die im Periodensystem stehen, durch Sterne erzeugt wurden! (mit Ausnahme von Wasserstoff und 10 % Helium)

Aktivität 2: Zum Abschätzen und Diskutieren

(a) Wie viel Masse wandelt die Sonne pro Sekunde in Energie um, wissend, dass pro Sekunde 500 Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium in ihrem Kern verschmelzen?

(b) Die Sonne besitzt eine Gesamtmasse von $2 \cdot 10^{33}$ Gramm. Bedeutet dies, dass die Sonne auf Grund dieses Massenverlusts irgendwann verschwinden wird? Diskutiere und argumentiere.

1.1 Die Farbe der Sterne

Die Farbe und die Leuchtkraft der Sterne sind Größen, die die Sterne charakterisieren und quantitativ beschreiben. Warum Sterne unterschiedliche Farben haben, hängt von ihrer Temperatur ab. Um dies zu verstehen, müssen wir uns mit der Strahlung der Sterne beschäftigen.

Wir können die Strahlung der Sterne als Wellenphänomen beschreiben und sprechen hierbei von *elektromagnetischen Wellen*. Wichtige Größen zur Beschreibung einer Welle sind *die Wellenlänge* λ (der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder Wellentälern), *die Frequenz f,* die uns sagt, wie viele Wellenberge oder Wellentäler pro Sekunde bei uns ankommen, und *die Amplitude A*, welche aussagt, wie hoch ein Wellenberg über die Nulllinie reicht (Abb.4).

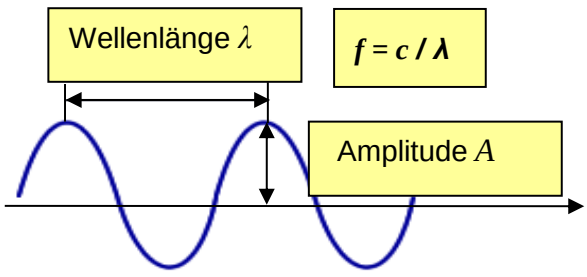

Abbildung 4 (Credit: Scorza)

Je kürzer die Wellenlänge ist, desto mehr Wellen können pro Sekunde gezählt werden, und entsprechend höher ist die Frequenz (siehe Abb. 7). Umgekehrt wird die Frequenz kleiner, wenn die Wellenlänge zunimmt. Die Frequenz f lässt sich aus der Wellenlänge λ und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c mittels der Beziehung $f = c / \lambda$ berechnen. Im Vakuum beträgt c rund 300.000 km/s.

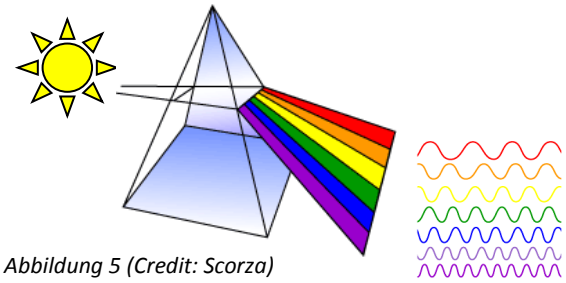

Abbildung 5 (Credit: Scorza)

Das farbige Spektrum des Sonnenlichts wird durch elektromagnetische Wellen erzeugt, die *unterschiedliche Frequenzen* haben. Die Wellen im Violettbereich haben eine höhere Frequenz als die im Blaubereich und diese wiederum eine höhere als die Wellen im Rotbereich. Außerhalb des Rot- und des Violettbereichs erstreckt sich das elektromagnetische Spektrum zu kürzeren (Ultraviolett, Röntgen- und Gammastrahlung) und längeren (Infrarot, Mikro- und Radiowellen) Wellenlängen (siehe Abb. 6). Jenseits des visuellen Bereiches, können wir die Strahlung nicht mit unseren Augen wahrnehmen, weil die „Detektoren" unserer Augen (die Sehzellen in der Netzhaut des Auges) nicht empfindsam dafür sind.

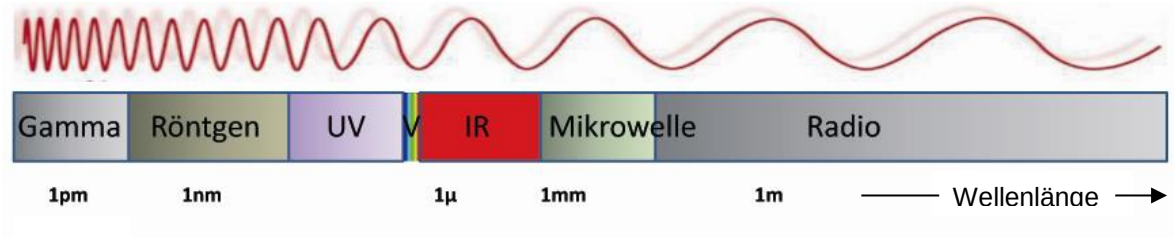

Abbildung 6 (Credit: Scorza)

Elektromagnetische Wellen *transportieren Energie.* Die Strahlungsenergie einer Welle hängt von der Frequenz und von der Amplitude der Welle ab. Je höher die Frequenz und je größer die Amplitude ist, desto mehr Energie kann eine Welle transportieren: $E \sim f$, $E \sim A^2$.

Aktivität 3: Eine kurze Gruppendiskussion
Beantworte die folgenden Fragen: (a) Welche elektromagnetische Welle hat die längste Wellenlänge? (b) Welche hat die höchste Frequenz? (c) Welche Wellen transportieren die meiste Energie? (d) … und welche die geringste? (e) Wie heißt die Strahlung der Sonne, die durch die Ozonschicht in der Erdatmosphäre absorbiert wird?

Wenn das Licht eines Sterns mit einem Prisma zerlegt wird, können wir die Farben, oder genauer gesagt die elektromagnetischen Wellen, analysieren, aus denen sich das Sternenlicht zusammensetzt. In Abb. 7 ist das Spektrum der Sonne zu sehen. Jede Farbe entspricht, wie bereits erklärt, einer 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 grün-gelben Lichts aussendet. Weil sich alle Farben bei dieser Energieverteilung in unseren Augen mischen, sehen wir die Sonne gelb!

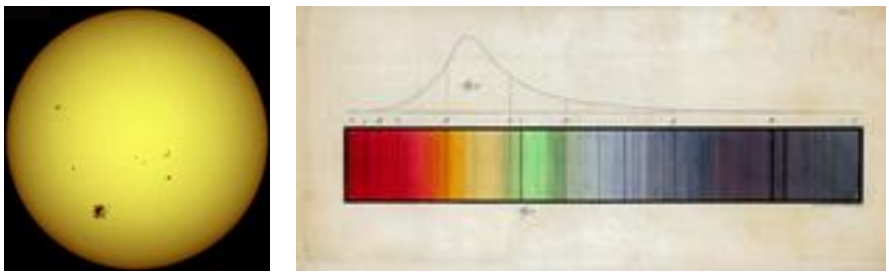

Abbildung 7: Links: Aufnahme der Sonne (Credit NASA),
rechts: das Fraunhofer Sonnenspektrum (Credit: Deutsches Museum)

Betrachten wir nun genauer die Sterne des Wintersternbilds Orion (Abb. 8b). 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. 8a 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.

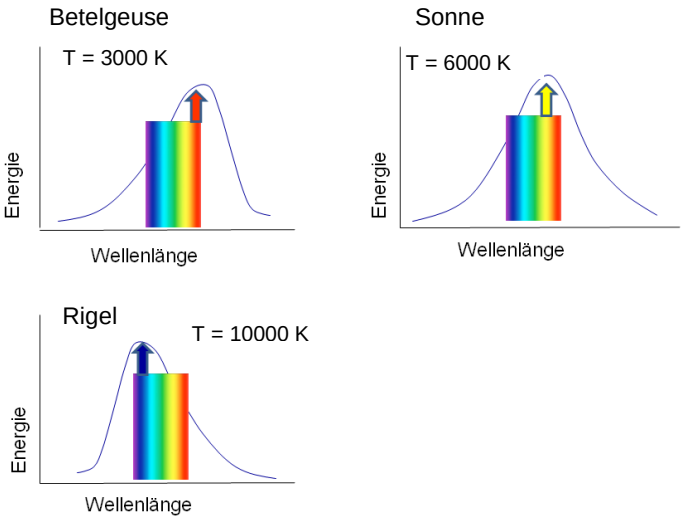

Abbildung 8a (Credit: Scorza)

Abbildung 8b (Credit: Mauser)

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 in einem 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 Oberflächentemperatur in verschiedene Spektralgruppen ein, die sie mit den folgenden Buchstaben bezeichnen: O, B, A, F, G, K und M. In Tabelle 1 sind die Temperaturbereiche und Sternfarben aufgelistet, die den jeweiligen Sterntypen entsprechen.

Typ	**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

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

„**O**h **B**e **A** **F**ine **G**irl, **K**iss **M**e“
oder
„**O**h **B**e **A** **F**ine **G**uy, **K**iss **M**e“

Aktivität 4: Die hellsten Sternen mit ihren Sternbilder zuordnen
Der hellste Stern eines Sternbildes wird als α-Stern bezeichnet. In der Regel haben diese Sterne eigenen Namen, die zum Teil aus dem Griechischen, zum anderen Teil aus dem arabisch-islamischen Kulturraum stammen.
Nimm die Karten des Sets „Sterne“ und mische sie. Wähle alle Karten mit den Sternbildern aus der Sorte (a) und finde die zugehörigen Karten mit den Sternengruppen (b) dazu. Versuche dabei, dir die Form der Sternbilder, die Namen der hellsten Sterne und ihre Bedeutung zu merken.

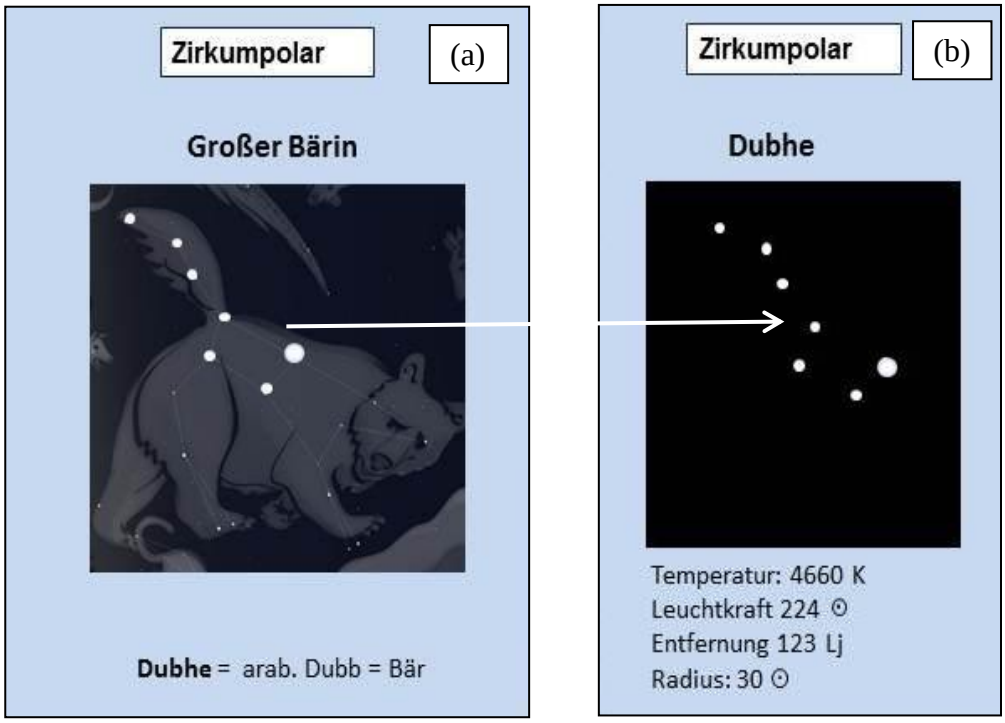

Abb. 9 (Credit: Scorza und Stellarium)

Aktivität 5: Nimm die blauen Karten (b) des Sets „Sterne“, lies die Temperatur der Hauptsterne ab und vervollständige die Angaben zur Farbe auf der Tabelle 2 anhand der Information der Tabelle 1 (Temperatur und Farbe). Male mit bunten Stiften die Hauptsterne der Karten je nach ihrer Farbe aus. Finde mit den dazugehörigen Paaren des Kartensets und anhand einer drehbaren Sternkarte heraus, in welcher Jahreszeit die entsprechenden Sternbilder der Hauptsterne zu sehen sind.

Sterne	Im Sternbild / Jahreszeit	Temperatur K	Farbe	Typ
Dubhe				
Polaris				
Shedir				
Thuban				
Capella				
Sirius				
Aldebaran				
Beteigeuze				
Arcturus				
Regulus				
Spica				
Deneb				
Altair				
Antares				
Sirrah				
Markab				
Mirfak				
Wega				

Tabelle 2

1.2. 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 wie die eines Sterns, die ihre Energie gleichmäßig abgibt, ergibt sich aus:

(1) $L = f \cdot A$

Hier bezeichnet *f* den Energiefluss (Energie pro Zeit und Fläche A) in der Entfernung ***r*** von dem Stern und wird in Watt / m^2 angegeben. Da die Strahlung eines Sterns in alle Richtungen gleich ist, können wir annehmen, dass sich die Gesamtenergie des Sterns auf die Oberfläche einer imaginären Kugel um den Stern mit dem Radius ***r*** und Fläche $A = 4\pi r^2$ verteilt (siehe Abb.10). Aufgrund der Energieerhaltung können wir die Leuchtkraft dann folgendermaßen schreiben:

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

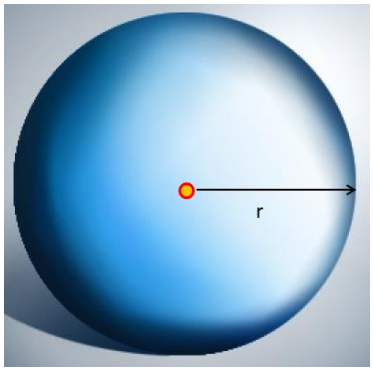

Abb.10 (Credit: Scorza)

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 6: 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:

$f = 1.36 \cdot 10^3 Watt \cdot m^{-2}$

Der Abstand der Erde von der Sonne beträgt

$r = 1AU = 1.5 \cdot 10^{11} m$ (AU bzw. AE ist die Entfernung Erde-Sonne, die sogenannte 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 dies der Stern ist, den wir am besten kennen. Durch die Übungsaufgabe haben wir gesehen, dass die Sonne mit einer Leuchtkraft von 3,84 x 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 eine Leuchtkraft von $L/L_\odot = 0.5$

1.3 Der Zusammenhang zwischen Leuchtkraft, Temperatur und Radius

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

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

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

(4) $f \sim T^4$

Dieses besagt, dass die Menge an Wärmeenergie (*f*), die ein schwarzer Körper von seiner Oberfläche abstrahlt, 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 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 Fläche 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) $\frac{L}{L_{sun}} = \left(\frac{R}{R_{sun}}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{sun}}\right)^4$ und

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

Aktivität 7: Die Sonne und Kapella vergleichen

Betrachte Kapella, den hellsten Stern des Sternbildes 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* (Kapella) = 5150 K
Sonne: $T_\odot$ = 5840 K
L(Kapella)/$L_\odot$ = 141

Mit allen diesen Übungen hast du einen guten Einblick in die Eigenschaften der Sterne gewonnen!