

Beteigeuze - Ein Riese mit Tücken

In Bezug zum Beitrag „Beteigeuze ist kleiner als erwartet“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 3/2021, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, S.13, Zielgruppe: Mittel- und Oberstufe, WIS-ID: 1421048

Monika Maintz

Bei Berechnungen mit dem Taschenrechner neigen Schülerinnen und Schüler gerne dazu, das Ergebnis bis auf die letzte Kommastelle genau anzugeben, die der Taschenrechner ausspuckt. Dass das in der Regel nicht sinnvoll ist, lässt sich meist nur schwer vermitteln. Dafür muss man sich klar machen, dass die Genauigkeit, mit der man einen berechneten Wert angeben kann, maßgeblich davon abhängt, wie genau die Messwerte ermittelt werden konnten, die der Berechnung zugrunde liegen. Ein gutes Beispiel dafür ist der Riesenstern Beteigeuze (Abb. 1). Er gehört zu den größten bekannten Sternen und steht uns vergleichsweise nahe. Daher ist es nicht verwunderlich, dass er der erste Stern ist, abgesehen von der Sonne, bei dem es gelang, die Oberfläche mit Teleskopen räumlich aufzulösen. Auch sonst wurde und wird er von vielen Forschungsgruppen eingehend untersucht. Dennoch ist es bisher nicht gelungen, Größen wie seine Entfernung oder seinen Radius hinreichend genau zu bestimmen. Entsprechende Angaben in der Literatur unterscheiden sich bisweilen beträchtlich. Ein Stern wie Beteigeuze, der viele Tücken aufweist, eignet sich daher gut als Beispiel für die [Erörterung der Frage, wie genau man Messwerte bzw. die daraus berechneten Ergebnisse sinnvollerweise angeben sollte.](#)

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sterne	Veränderliche Sterne , Sternentwicklung , Bestimmung von Sternradien , Beteigeuze , Rote Riesen , Überriesen , HRD , pulsierende Sterne , halbregelmäßige Veränderliche , Pulsationsveränderliche , Stefan-Boltzmann-Gesetz , Interferometrie , Winkeldurchmesser von Sternen , Radius von Beteigeuze
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnisgewinnung, Wertung)	Qualität von Messwerten abschätzen , Ergebnisse beurteilen



Abbildung 1: Künstlerische Darstellung des Überriesen Beteigeuze. Sie zeigt den Stern so, wie man ihn sich aufgrund von Daten vorstellen muss, die mit verschiedenen Beobachtungstechniken am Very Large Telescope (VLT) der ESO gewonnen wurden. Zwei unabhängige Forschungsgruppen erhielten auf diese Weise das bislang detailreichste Bild des Sterns. Dabei zeigte sich, dass Beteigeuze eine gewaltige Gaswolke ausstößt, die fast so groß wie unser Sonnensystem ist, und dass an seiner Oberfläche gigantische Gasblasen brodeln. ©: ESO/L. Calcada.

Von der Hauptreihe zum Riesenstern

[zurück zum Anfang](#)

Das Aufblähen vom Hauptreihenstern zum Roten Riesen oder Roten Überriesen kommt dadurch zustande, dass der Wasserstoff im Zentrum eines Sterns, der während der Hauptreihenphase für die Energieerzeugung genutzt wird, allmählich aufgebraucht ist. Dadurch verringert sich die Menge an Energie, die ein Stern innerhalb seines Kerns durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium gewinnen kann. Schließlich kommt dieser Prozess sogar ganz zum Erliegen. Die Energieerzeugung in Form von Wasserstofffusion findet dann nur noch in einer dünnen Schicht statt, die den ausgebrannten Heliumkern wie eine Schale umgibt (Schalenbrennen). Während sich die Wasserstofffusionszone immer weiter nach außen verlagert, sammeln sich im Kernbereich des Sterns immer mehr Heliumatomkerne an.

Als Folge der drastischen Veränderungen im Sterninnern gerät das hydrostatische Gleichgewicht, das den Stern bisher stabil gehalten hat, aus den Fugen. Der Gasdruck in Zusammenspiel mit dem Strahlungsdruck und den Zentrifugalkräften, die durch die Sternrotation entstehen, kann den Druckkräften, die durch die Gravitation hervorgerufen werden, nun nicht mehr die Waage halten. Der Stern versucht, ein neues Druckgleichgewicht zu finden. Was dabei genau passiert, hängt von seiner Masse ab und von der Menge an schwere Elementen, die in ihm enthalten sind.

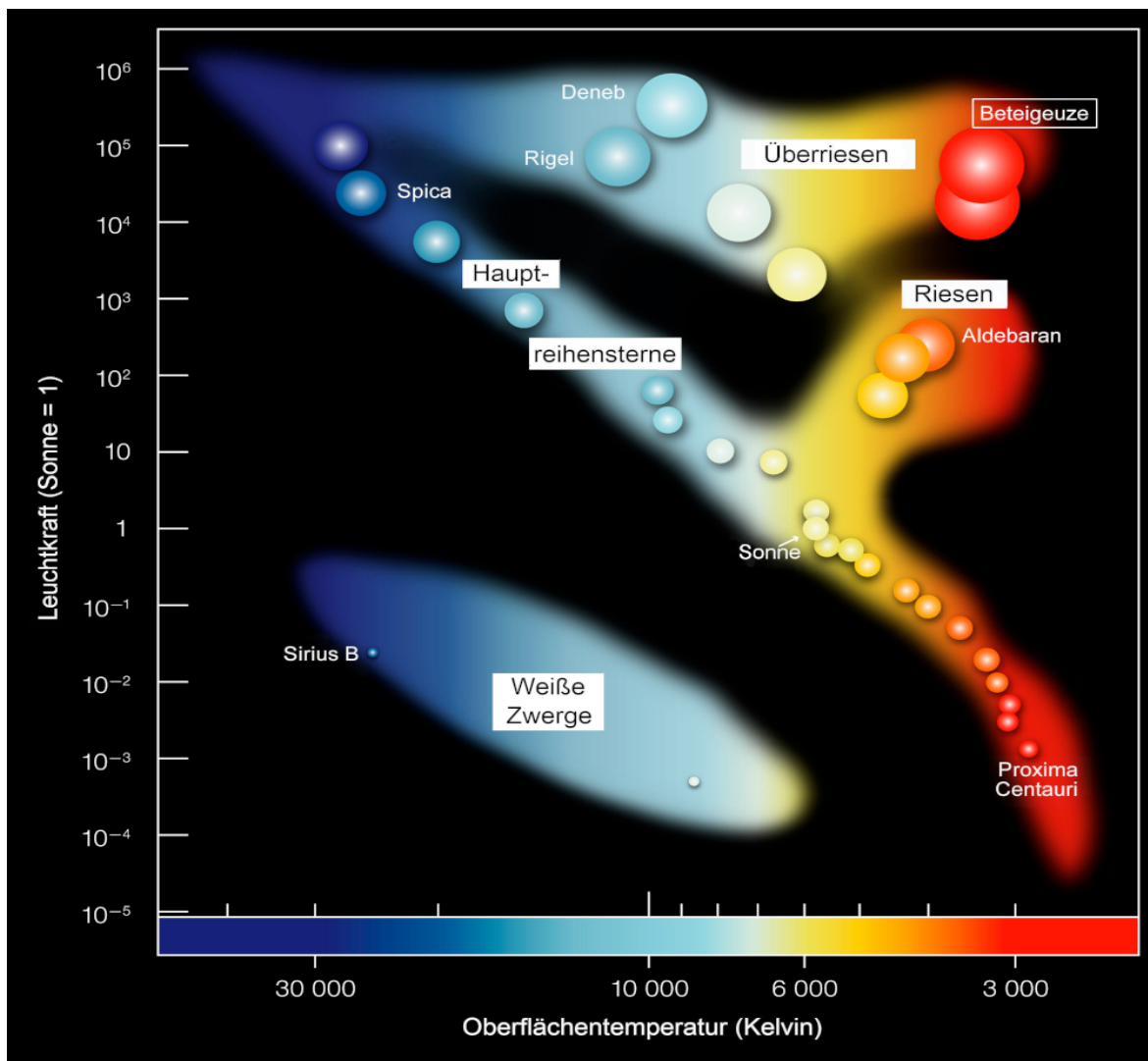


Abbildung 2: Lage von Beteigeuze im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Der Stern befindet sich rechts oben im Bereich der roten Überriesen. ©: ESO - File: Hertzsprung-Russell_StarData_af.jpg, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=94455140>, Bearbeitung: Monika Maintz.

[zurück zum Anfang](#)

Bei massearmen Sternen wie der Sonne, deren Massen im Bereich von 0,08 bis 2 Sonnenmassen³, setzt sich die Fusion von Wasserstoff zu Helium nach dem Ende des zentralen Wasserstoffbrennens in einer Schale um den ausgebrannten Kern fort. Der Heliumkern wächst dadurch weiter an und verdichtet sich, während die ihn umgebende Wasserstoffbrennzonenzone immer weiter nach außen wandert. Infolge dieser Vorgänge bläht sich die Sternhülle auf und die Sterne entwickeln sich zu Roten Riesen.

Sterne mittlerer Masse im Bereich von 2 bis 8 Sonnenmassen³ decken ihren Energiebedarf nach dem Ende des Wasserstoffbrennens im Kern durch zwei Prozesse: zum einen durch die Fortführung der Wasserstofffusion mit Hilfe des Schalenbrennens und zum anderen durch die Kontraktion des ausgebrannten Heliumkerns. Die Energie, die durch die Kernkontraktion freigesetzt wird, gelangt zum Teil als Strahlung nach außen. Der Rest wird dazu verwendet, den Heliumkern weiter aufzuheizen. Dieser wird schließlich so dicht und so heiß, dass die Heliumfusion zündet. Während diese Prozesse im Sterninnern ablaufen, expandieren die äußeren Schichten der Sterne und sie werden zu Roten Riesen.

Die Vorgänge, die dazu führen, dass sich massereiche Sterne mit 8 bis 25 Sonnenmassen³ nach dem Ende der zentralen Wasserstofffusion zu **Roten Riesen und Überriesen** weiterentwickeln, laufen ähnlich ab wie bei den Sternen mittlerer Masse. Nach dem Erlöschen der Heliumfusion in ihrem Kernbereich können massereiche Sterne jedoch noch weitere Fusionsprozesse durchlaufen, bis als Endprodukt in ihrem Kern Eisen entsteht. Damit einher gehen mehrere Kontraktionsphasen und die Bildung weiterer Schalen, in denen Fusionsreaktionen analog zur Wasserstoffbrennschale weiterlaufen.

Mit zunehmender Masse sind Sterne im Laufe ihrer Entwicklung immer stärker von Massenverlusten durch Sternwinde betroffen. Die massereichsten Sterne mit Massen von 25 bis 120 Sonnenmassen³ durchlaufen alle nuklearen Brennprozesse so schnell und verlieren dabei so viel Masse, dass sie das Stadium der Roten Überriesen gar nicht erreichen und bereits auf dem Weg dorthin als Supernova explodieren.

Veränderliche Sterne

[zurück zum Anfang](#)

In den letzten Phasen ihres Sternenlebens werden Sterne anfällig für Schwingungen, d. h. Störungen des Druckgleichgewichts in ihrem Inneren führen dazu, dass sie sich etwas ausdehnen und wieder zusammenziehen - sie schwingen um eine Mittellage. Sichtbar werden diese Schwingungen oder Pulsationen durch Schwankungen der Sternhelligkeiten. Sterne, die ein solches Verhalten zeigen, gehören zur Gruppe der veränderlichen Sterne oder präziser zu den **Pulsationsveränderlichen**.

Bei Sternen wie den Cepheiden⁴ (Überriesen der Spektralklassen F bis K) erfolgen die Helligkeitsänderungen streng periodisch. Bei den **halbregelmäßigen Veränderlichen** variieren die Helligkeiten dagegen ungleichmäßig. Zu ihnen gehören Rote Riesen der Spektralklassen K, M, C und S, Rote Überriesen der Spektralklassen K und M sowie Gelbe Überriesen der Spektralklassen F, G und K.

Der Grund für das unterschiedliche Verhalten liegt darin, dass die Cepheiden regelmäßig pulsierenden, während ein Teil der halbregelmäßigen Veränderlichen nur ungleichmäßige Schwingungen ausführt. Wenn man diese Pulsationen jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg beobachtet, kann man mittlere Schwingungsperioden für die einzelnen Sterne ableiten. Der andere Teil der halbregelmäßigen Veränderlichen umfasst Sterne, die regelmäßig pulsieren, aber ab und an durch verschiedene Einflüsse gestört werden. Deshalb geraten sie immer wieder für eine gewisse Zeit außer Takt. Die Folge ist ein unregelmäßiger Helligkeitswechsel.

3 Angaben nach Voigt, Hans-Heinrich, Abriss der Astronomie, Hrsg. von Hermann-Josef Röser und Werner Tscharnuter, 6. Auflage, 2012, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, S. 461 ff

4 WIS-Beitrag 10/2003: „Entfernungen im Universum: die Cepheiden-Methode“, <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/entfernungen-im-universum-die-cepheiden-methode/1051553>

5 SR oder „Semi Regular“: Englisch für „halbregelmäßig“

[zurück zum Anfang](#)

Auch **Beteigeuze ist ein halbregelmäßiger Veränderlicher**. Der Stern gehört zur Untergruppe SRc⁵, die die Roten Überriesen der Spektralklasse K und M beinhaltet. Seine Variabilität und sein ungleichmäßiger Lichtwechsel sind in Abb. 4 gut zu erkennen. In dem Diagramm wurden scheinbare Helligkeiten von Beteigeuze, die im Zeitraum von Dezember 1988 bis August 2002 gemessen wurden, in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Als Resultat ergibt sich eine Lichtkurve.

Bei der Analyse solcher Lichtkurven wurde entdeckt, dass Beteigeuze mehrere Schwingungsperioden aufweist: eine dominierende, deutlich in Erscheinung tretende Periode von etwa 400 Tagen (Grundschwingung) und eine lange Sekundärperiode von über 2.000 Tagen. In der jüngsten Untersuchung von *Joyce et al.*⁶, die im Oktober 2020 veröffentlicht wurde, wird die Entdeckung einer dritten Periode bekanntgegeben, die mit etwa 185 Tagen deutlich kürzer ist und eine Oberschwingung der 400-Tage-Periode darstellt.

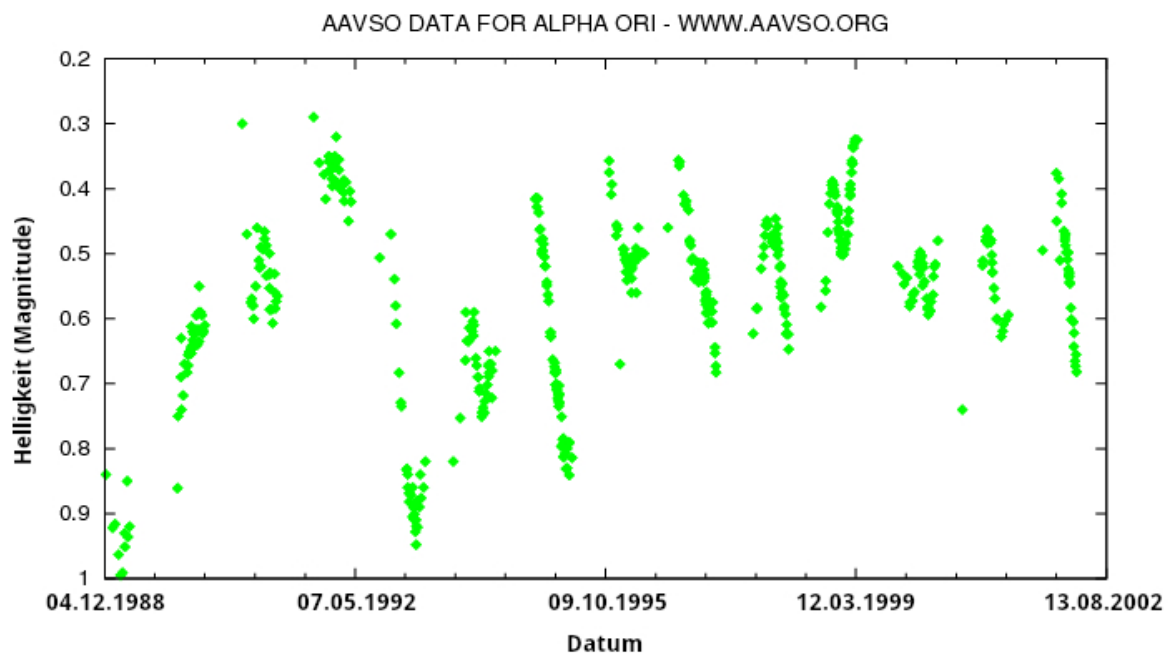


Abbildung 3: Die Lichtkurve stellt die schwankende Helligkeit von Beteigeuze im Zeitraum vom 4. Dezember 1988 bis zum 13. August 2002 dar. ©: AAVSO - AAVSO Light Curve Generator (LCG): <http://www.aavso.org/data/lcg/>, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2205198>, Bearbeitung: Monika Maintz.

[zurück zum Anfang](#)

Messung von Sternradien

Um den Radius eines Sterns zu bestimmen, kann man verschiedene Methoden anwenden. Im Folgenden werden zwei davon kurz vorgestellt.

⁵ SR oder „Semi Regular“: Englisch für „halbregelmäßig“

⁶ Joyce et al. (2020): „Standing on the Shoulders of Giants...“, publiziert in: The Astrophysical Journal, Oktober 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.09837.pdf>, genaue Angabe: siehe „Literaturangaben und Links“

[zurück zum Anfang](#)

1. Radiusbestimmung mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

Zwischen der Leuchtkraft L , dem Radius R und der Effektivtemperatur T_{eff} eines Sterns besteht nach dem **Gesetz von Josef Stefan und Ludwig Boltzmann** folgender Zusammenhang:

$$L = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4.$$

Die Strahlungsleistung eines Sterns hängt also von der Größe seiner Oberfläche ab, die in der Gleichung als kugelförmig angenommen wird ($4\pi R^2$), und ist proportional zur 4. Potenz seiner Effektivtemperatur. Die Konstante σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante⁷. Löst man die Gleichung nach R auf, so erhält man:

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4}}$$

Kennt man die Leuchtkraft und die Effektivtemperatur eines Sterns, so kann man seinen Radius folglich direkt berechnen. Zu bedenken ist jedoch, dass die Formel nur für Schwarze Strahler bzw. Temperaturstrahler exakt gilt, d. h. für idealisierte Körper, die elektromagnetische Strahlung nur aufgrund ihrer Temperatur aussenden und dabei streng den Strahlungsgesetzen folgen. Da Sterne dieses Kriterium hinreichend gut erfüllen, kann man die Methode verwenden.

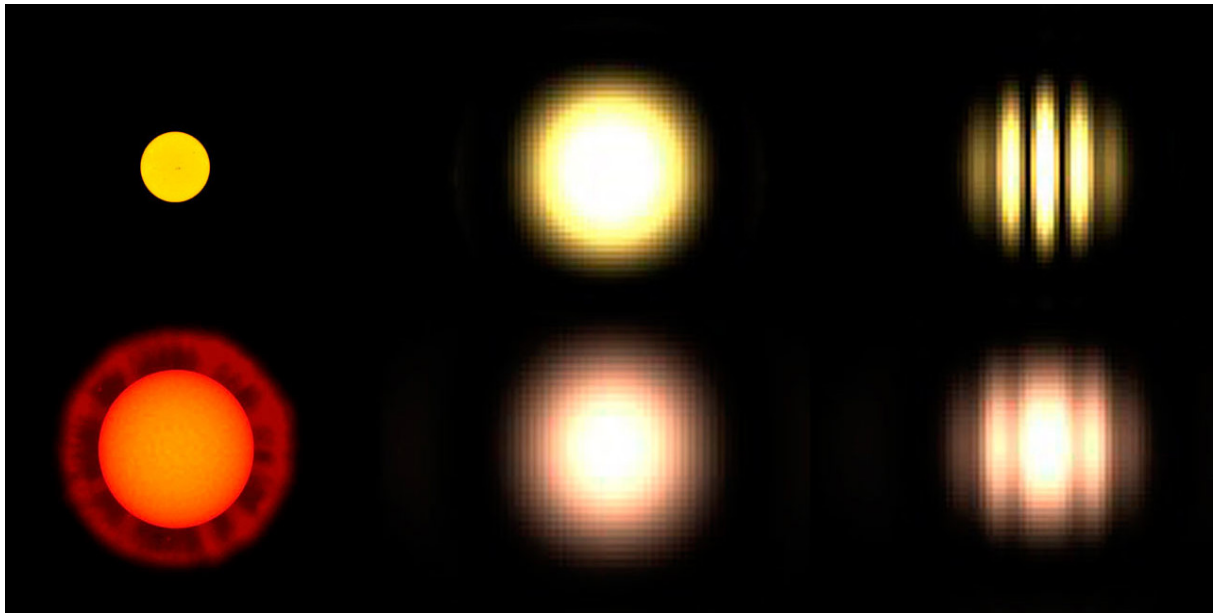


Abbildung 4: Die Darstellung zeigt schematisch, wie die Bilder zweier Sterne mit verschiedener Winkelgröße (links) aussehen würden, wenn man sie mit einem Einzelteleskop (Mitte) und mit einem Interferometer wie dem VLT der ESO in Chile (rechts) abbilden würde. Während zwischen den Aufnahmen eines Teleskop kaum Unterschiede zu erkennen sind (Mitte), unterscheiden sind die Interferenzmuster (rechts) deutlich. Besonders im Interferenzbild rechts unten ist die Aufhellung der Minima gut zu erkennen. Obere Reihe: Sirius im Sternbild Großer Hund; untere Reihe: Alphard im Sternbild Wasserschlange. ©: ESO.

6 Joyce et al. (2020): „Standing on the Shoulders of Giants...“, publiziert in: The ApJ, Oktober 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.09837.pdf>; genaue Angabe: siehe „Literaturangaben und Links“

7 Für die Stefan-Boltzmann-Konstante σ gilt: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

[zurück zum Anfang](#)

2. Interferometrische Bestimmung des Winkeldurchmessers

Um das Prinzip besser zu verstehen, das hinter der Messung von Sternradien mit interferometrischen Methoden steht, betrachten wir den Doppelspaltversuch aus der Optik: Beleuchtet man zwei schmale, parallele Spalte mit kohärentem Licht, also mit Lichtwellen, die dieselbe Wellenlänge haben und deren Schwingungsphasen in einer festen Beziehung zueinander stehen wie bei Laserlicht, dann wird das Licht beim Durchgang durch die Spalte an den Spalträndern gebeugt. Dadurch ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Lichtwellen. Anstatt geradlinig weiterzulaufen, breiten sie sich hinter den Spalten halbkreisförmig aus und überlagern sich (sie interferieren). Wenn Wellenberge auf Wellenberge oder Wellentäler auf Wellentäler treffen, kommt es zu einer konstruktiven Überlagerung bzw. Interferenz und damit zu einer Lichtverstärkung. Dort, wo Wellenberge auf Wellentäler treffen, löschen sich die Wellen gegenseitig aus. Auf diese Weise entsteht ein Interferenzmuster, das auf einem Projektionsschirm als Abfolge von hellen und dunklen Streifen (Maxima und Minima) sichtbar wird.

Wenn man das Licht eines Sterns interferometrisch beobachtet, d. h. mit zwei oder mehr Teleskopen gleichzeitig auffängt und in einer für alle Teleskope gemeinsamen Brennebene überlagert, dann entsteht ebenfalls ein Interferenzmuster (Abb. 5, rechts). Auch hier wechseln sich helle und dunkle Streifen ab. Wenn die Auflösung des Interferometers nicht ausreicht, um die Sternoberfläche räumlich aufzulösen, und man den Stern nur als Punktquelle abbilden kann, dann sind die Maxima und Minima durch einen großen Helligkeitskontrast scharf voneinander getrennt. Gelingt es jedoch, die Sternoberfläche räumlich aufzulösen, dann verschwimmt dieser Kontrast (Abb. 5, rechts, im unteren Bild gut zu erkennen): Die Minima werden aufgehellt, da Licht aus den Maxima in die Minima „einsickert“. Der Grund dafür ist, dass nun das Licht - im Gegensatz zur Punktquelle - von einem aufgelösten Sternscheibchen und damit von mehreren benachbarten Punkten kommt. Aus der Stärke dieser Aufhellung bzw. aus dem Verschwinden des Kontrasts kann man den Winkeldurchmesser des Sterns ableiten¹¹. Wenn man zusätzlich seine Entfernung kennt, kann man seinen linearen Durchmesser berechnen.

Bei Sternen, die nicht pulsieren, kann man den Radius mit den beschriebenen Methoden im Prinzip schon mit einer Einzelmessung hinreichend gut bestimmen. Bei schwingenden Sternen hat man das Problem, dass sich der Radius ständig ändert, weil sich durch das Aufblähen und wieder Zusammenziehen die Oberfläche periodisch vergrößert und verkleinert, wobei sie gleichzeitig abkühlt und dann wieder heißer wird. Daher sind auch die Leuchtkraft, die Effektivtemperatur und der Winkeldurchmesser nicht mehr konstant.

Winkeldurchmesser (in Millibogensekunden) interferometrisch gemessen		Linearer Radius (in Sonnenradien) Äquatorradius der Sonne: 696.342 km (= 1 Sonnenradius oder 1 R _☉)		Entfernung (in Lichtjahren)	
Literaturnachweis	Wert	Literaturnachweis	Wert	Literaturnachweis	Wert
Michelson & Pease (1921) ⁸	47 ± 5	Dolan et al. (2016) ⁸	Untergrenze: 500 Obergrenze: ~ 1100	van Leeuwen (2007) ⁸ , Hipparcos-Daten	498,78 +71,72 -55,42
Ohnaka et al. (2009) ⁹ VLTI-Messungen	43,56 ± 0,06	Joyce et al. (2020)	764 +116 -62	Harper et al. (2008) ⁸	642,22 ± 146,7
Ohnaka et al. (2011) ¹⁰ VLTI-Messungen	42,49 ± 0,06			Harper et al. (2017) ⁸	723,72 +156,48 -110,84
Montargès et al. (2014) ⁸	42,28 ± 0,43			Joyce et al. (2020)	548,01 +89,65 -48,57

Tabelle 1: Beispiele für Winkeldurchmesser, lineare Radien und Entfernungen, die für den Roten Überriesen Beteigeuze bestimmt wurden. Die genaue Literaturangabe für die Publikation von Joyce et al. (2020), aus der die meisten Angaben entnommen sind, ist unter „Literaturangaben und Links“ zu finden.

⁸ Angabe entnommen aus Joyce et al. (2020): „Standing on the Shoulders of Giants...“, publiziert in: The Astrophysical Journal, Oktober 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.09837.pdf>; genaue Angabe: siehe „Literaturangaben und Links“

⁹ Publiziert in: Astronomy & Astrophysics, Band 503, Ausgabe 1, 2009, S. 183-195, <https://arxiv.org/pdf/0906.4792.pdf>

¹⁰ Publiziert in: Astronomy & Astrophysics, Band 529,+ <https://arxiv.org/pdf/1104.0958.pdf>

¹¹ siehe S. 10 im WIS-Beitrag „Zebrastrifen“ im Schulfernrohr - ein Zweistrahlinterferometer für die Schule, <http://www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2020-10-OS-Interferometer.pdf>

[zurück zum Anfang](#)

Der Radius von Beteigeuze

Wenn man den Radius von Beteigeuze bestimmen will, muss man bedenken, dass der Stern in die Kategorie der halbregelmäßigen Veränderlichen fällt. Wie alle Sterne dieser Gruppe schwingt auch er nur ungleichmäßig und seine Periodizität ist schlecht definiert. Die unregelmäßige Pulsation bewirkt, dass sich seine Größe bzw. sein Radius zwar zyklisch, aber ungleichmäßig ändern. Analoges gilt für seine Oberfläche und Effektivtemperatur und damit auch für seine Leuchtkraft und seine Helligkeit.

Aufgrund der Pulsation kann man für Beteigeuze nur einen mittleren Radius bestimmen, der dadurch definiert ist, dass der Stern durch seine Mittellage schwingt. Es ist jedoch nicht leicht, festzustellen, wann dieser Fall eintritt. Wegen des unregelmäßigen Lichtwechsels kann man zum Beispiel keinen einfachen Zusammenhang zwischen Helligkeit und Sterngröße bzw. Radius ableiten, wie das etwa für die gleichmäßig schwingenden Cepheiden mit ihren regelmäßigen Helligkeitsänderungen möglich ist.

Für Pulsationsveränderliche wie Beteigeuze kann man Zustandsgrößen wie den Sternradius mit Hilfe von Modellrechnungen bestimmen. Dafür benötigt man eine Lichtkurve aus möglichst vielen Helligkeitsmessungen, die idealerweise während eines langen Zeitraums gemacht wurden und viele Schwingungsperioden umfassen. Anhand dieser Daten wird eine Frequenzanalyse durchgeführt mit dem Ziel, alle Perioden zu identifizieren, mit denen der Stern analog zu einem Musikinstrument schwingt. Das Ergebnis dient als Grundlage für weitere Simulationsrechnungen. Etwas salopp gesagt versucht man dabei durch Ausprobieren verschiedener Werte diejenige Kombination von Sternparametern zu finden, die am besten zu einem Stern passt, der mit den zuvor gefundenen Perioden schwingt.

Aufgrund seiner Größe und Nähe zu unserem Sonnensystem gehört Beteigeuze zu den wenigen Sternen, deren Oberfläche man mit interferometrischen Methoden räumlich als Scheibe auflösen kann. Daher ist es möglich, den Durchmesser des Sterns als Winkel am Himmel direkt zu bestimmen. Mögliche Fehlerquellen, die solche Messungen beeinflussen können, sind jedoch Schichten aus Staub und Molekülen in der Umgebung des Sterns, die seine Photosphäre verschleiern.

Ein weiteres Problem taucht auf, wenn man den **Winkeldurchmesser** in einen linearen Durchmesser umrechnen will. Dazu benötigt man eine zuverlässig bestimmte Entfernung. Ein Blick in die Literatur zeigt jedoch, dass die bisher ermittelten Entfernungen für Beteigeuze zum Teil stark voneinander abweichen und mit großen Fehlern behaftet sind (Tab. 1). Der Wert, den man für den linearen Durchmesser und damit für den Sternradius erhält, hängt also in hohem Maße von der zugrunde gelegten Entfernung ab.

Zusätzlich zu den pulsationsbedingten Schwankungen gibt es weitere Faktoren, die zur Unregelmäßigkeit des Helligkeitswechsels von Beteigeuze beitragen. Diese muss man im Auge behalten, wenn man Sternparameter zuverlässig bestimmen will. So wurde in der unteren Chromosphäre des Überriesen an zwei Stellen heißes Gas entdeckt, das Temperaturen aufweist, die deutlich über der Durchschnittstemperatur der Umgebung liegen. Eines dieser Gebiete ist als eine Art Ausbeulung am östlichen Rand von Beteigeuze erkennbar (Abb. 6, links). Diese örtlich begrenzten Aufheizungen entstehen vermutlich als Folge magnetischer Aktivitäten, die durch großräumige Konvektionsbewegungen in der Photosphäre von Beteigeuze hervorgerufen werden.

Auch riesige Sternflecken konnten nachgewiesen werden, die die Oberfläche des Sterns teilweise heller erscheinen lassen (Abb. 6, rechts). Die Ursache dafür sind vermutlich ebenfalls riesige Konvektionszellen, die aus tieferen Schichten bis zur Oberfläche aufsteigen.

Im Dezember 2019 begann Beteigeuze sich ungewöhnlich stark zu verdunkeln (Abb. 7). Die Helligkeit nahm dabei um fast zwei Drittel ab, was sogar mit dem bloßen Auge gut beobachtet werden konnte. Es schien auch so, als habe sich seine Form verändert. Mittlerweile haben Messungen gezeigt, dass ein gewaltiger Massenauswurf in Blickrichtung unseres Sonnensystems wohl die Ursache für dieses Phänomen war. Dabei entstand eine riesige Staubwolke, die eine Hälfte des Sterns verdeckte. Seit April 2020 leuchtet Beteigeuze wieder normal hell.

Genauigkeit von Rechenergebnissen

Im Folgenden rechnen wir den linearen Radius, den Joyce et al. (2020) für Beteigeuze bestimmt haben (Tab. 1), von Sonnenradien in Astronomische Einheiten (AE) um. Zuerst verwenden wir für den Sonnenradius und die Astronomische Einheit die exakten Werte (1), dann wiederholen wir die Rechnung mit den üblichen Näherungen (2):

$$\begin{aligned}
 \text{Linearer Radius von Beteigeuze:} & \quad R_B = 764 R_{\odot} \\
 \text{Radius der Sonne:} & \quad 1 R_{\odot} = 696.342 \text{ km} \approx 6,96 \cdot 10^5 \text{ km} \\
 \text{Astronomische Einheit:} & \quad 1 \text{ AE} = 149.597.870 \text{ km} \approx 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} \\
 R_B (1) & = [(764 R_{\odot} \cdot 696.342 \text{ km}) : 1 R_{\odot}] : 149.597.870 \text{ km} = 3,556.235,7 \text{ AE} \\
 R_B (2) & = [(764 R_{\odot} \cdot 6,96 \cdot 10^5 \text{ km}) : 1 R_{\odot}] : 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} = 3,554,4 \text{ AE}
 \end{aligned}$$

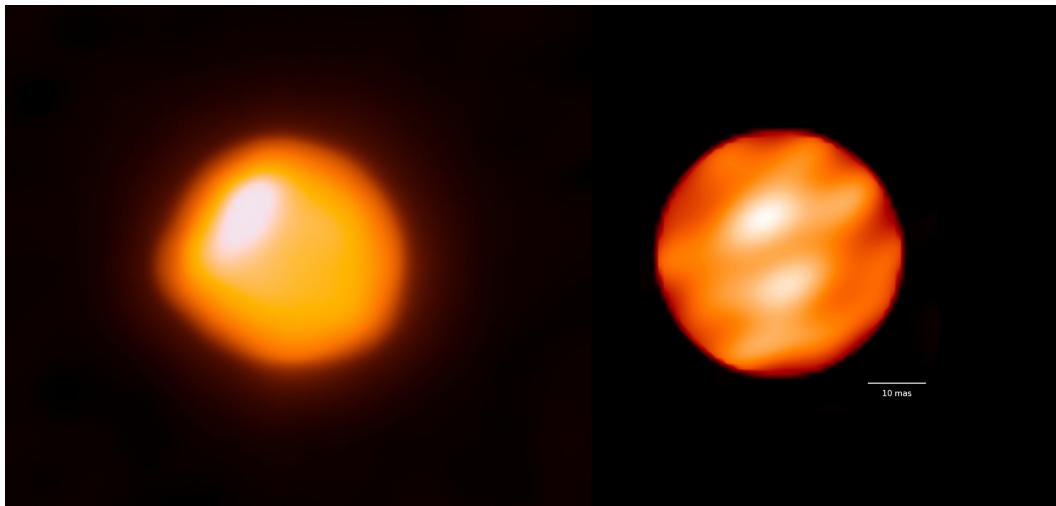


Abbildung 5: Links: Lokale Aufheizung des Gases in der unteren Chromosphäre von Beteigeuze (Aufnahme mit dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) der ESO im Bereich der Submillimeterwellen). Rechts: Zwei riesige Sternflecken lassen einige Gebiete auf der Oberfläche von Beteigeuze deutlich heller aussehen (Infrarot-Aufnahme mit dem Infrared Optical Telescope Array (IOTA), einem Interferometer aus drei Teleskopen). ©: Bild links: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/E. O’Gorman/P. Kervella. Bild rechts: Haubois, X.; Perrin, G.; Lacour, S. et al., *Astronomy & Astrophysics*, Band 508, S. 923-932 (2009), <https://arxiv.org/pdf/0910.4167.pdf>, veröffentlicht als „Astronomy Picture of the Day“ am 6. Januar 2010).

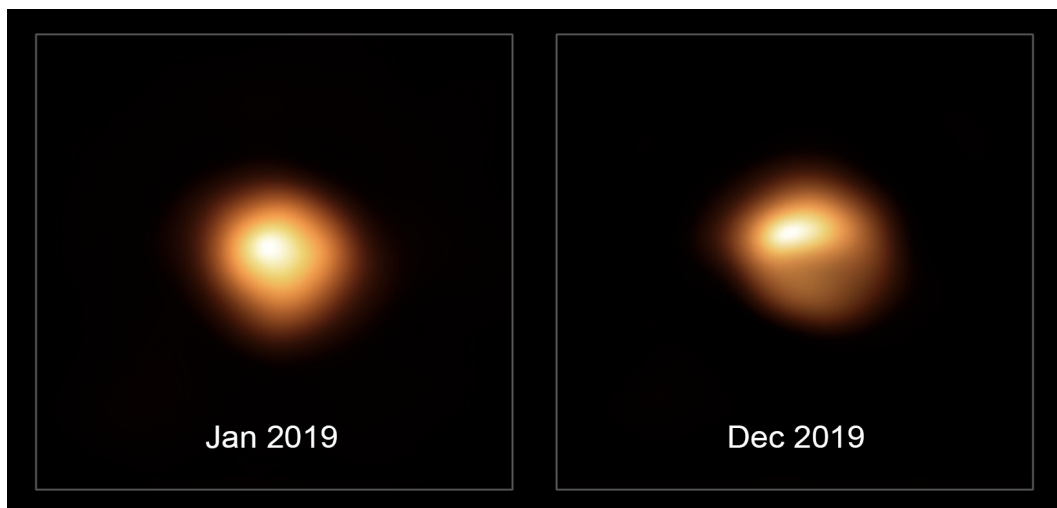


Abbildung 6: Die Bilder zeigen die Helligkeitsverteilung auf der Oberfläche des Roten Überriesen Beteigeuze im sichtbaren Licht vor (links) und während (rechts) der ungewöhnlich starken Verdunkelung des Sterns, die gegen Ende des Jahres 2019 begann. Beide Aufnahmen wurden mit dem Very Large Telescope Interferometer (VLTI) am Paranal-Observatorium der ESO in Chile gemacht. ©: ESO/M. Montargès et al.

[zurück zum Anfang](#)

Bevor wir den Radius noch einmal wie schon zuvor in Astronomische Einheiten umrechnen, vergrößern wir den Wert von $764 R_{\odot}$ um 1% auf $(764 R_{\odot} + 7,64 R_{\odot})$ und fügen so künstlich einen Messfehler hinzu:

$$R_B(3) = [(764 R_{\odot} + 7,64 R_{\odot}) \cdot 696.342 \text{ km}] : 1 R_{\odot} : 149.597.870 \text{ km} = 3.591.798.1 \text{ AE}$$

$$R_B(4) = [(764 R_{\odot} + 7,64 R_{\odot}) \cdot 6,96 \cdot 10^5 \text{ km}] : 1 R_{\odot} : 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} = 3,59 \text{ AE}$$

Ergebnisse im Vergleich:

$R_B(1) = 3.556.235.7 \text{ AE}$
$R_B(2) = 3.554.4 \text{ AE}$
$R_B(3) = 3.591.798.1 \text{ AE}$
$R_B(4) = 3,59 \text{ AE}$

Es zeigt sich, dass alle Werte bis zur ersten Nachkommastelle gleich sind. Vergleicht man das Ergebnis für $R_B(1)$ mit dem für $R_B(2)$ sowie für $R_B(3)$ mit dem für $R_B(4)$ ergibt sich ein Unterschied jeweils erst in der dritten Nachkommastelle. Dagegen unterscheiden sich die Berechnungen für $R_B(1)$ und $R_B(3)$ sowie für $R_B(2)$ und $R_B(4)$ schon in der zweiten Nachkommastelle. Eine Ungenauigkeit bei der Messung (hier im Beispiel nur 1%!) wirkt sich also stärker aus als etwa „ungenaueres Rechnen“ mit Näherungswerten. **Man muss sich daher immer fragen, wie exakt ein Rechenergebnis überhaupt sein kann, bevor man entscheidet, wie viele Stellen man angeben kann, ohne eine Genauigkeit vorzutäuschen, die gar nicht im Ergebnis steckt.** In unserem Beispiel reicht es völlig aus, den Radius von Beteigeuze folgendermaßen anzugeben:

$$R_B(\text{AE}) = 3,5 \text{ AE}$$

Generell kann man also ableiten, dass man einen berechneten Wert nicht dadurch „genauer“ machen kann, dass man ihn mit möglichst vielen Nachkommastellen versieht. **Die Exaktheit eines Wertes muss immer die Genauigkeit der zugrunde liegenden Messdaten widerspiegeln.**

Und zum Schluss ...

Der in Astronomische Einheiten umgerechnete Radius zeigt, dass es sich bei Beteigeuze tatsächlich um einen veritablen Riesen handelt: Würde man ihn in die Mitte unseres Sonnensystems legen, würde er einen Raum einnehmen, der sich weit über die Marsbahn hinaus in Richtung Jupiter erstreckt!

[zurück zum Anfang](#)

Literaturangaben und Links

Allgemein

- Zimmermann, Helmut; Gürtler, Joachim: ABC Astronomie, 9. Auflage, 2008, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/>

Beteigeuze

- Joyce, Meridith; Leung, Shing-Chi; Molnár, László; Ireland, Michael; Kobayashi, Chiaki; Nomoto, Ken'ichi (2020): „Standing on the Shoulders of Giants: New Mass and Distance Estimates for Betelgeuse through Combined Evolutionary, Asteroseismic, and Hydrodynamic Simulations with MESA“, publiziert in: The Astrophysical Journal, Band 902, Ausgabe 1, Oktober 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.09837.pdf>
- <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=betelgeuse>
- Sterne und Weltraum, Ausgabe September 2017, S. 15
- <http://www.solstation.com/x-objects/betelgeuse.htm>
- <https://www.spektrum.de/news/was-am-hype-um-beteigeuze-wirklich-dran-ist/1700066>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Beteigeuze>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Betelgeuse>

Sternentwicklung

- Voigt, Hans-Heinrich: Abriss der Astronomie, Hrsg. von Hermann-Josef Röser und Werner Tschamuter, 6., wesentlich überarbeitete und erweiterte Auflage, 2012, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, S. 461 ff
- <https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/hrdtx.html>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hydrostatisches-gleichgewicht/191>

Rote Riesen

- https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Riese

Rote Überriesen

- https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Überriese

Sternradien: Radiusbestimmung mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz

- <https://www.zum.de/Faecher/Materialien/gebhardt/astronomie/radius.html>

Beugung und Interferenz

- <https://www.leifiphysik.de/optik/beugung-und-interferenz/versuche/doppelspalt>
(Video zum Doppelspaltversuch)