

# Die Erforschung Roter Riesensterne: Ein Joint Venture zwischen Profis und Amateuren

Stefan Utenthaler

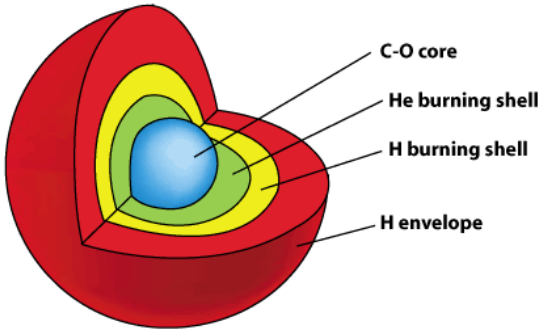
**Abstract:** Rote Riesen und Überriesen sind Spätstadien der Entwicklung von Sternen mit Massen von  $1-8 M_{\odot}$  bzw.  $8-35 M_{\odot}$ . Praktisch alle Sterne dieser Entwicklungsstufen sind Pulsationsveränderliche. Schon alleine deshalb gehören sie zu den lohnenden Objekten für Veränderlichenbeobachter. Manche Rote (Über-)Riesen zeigen über die meist regelmäßige Veränderlichkeit hinausgehende Phänomene, die dramatisch ausfallen können und vermutlich mit der Entwicklung im Sterninneren zusammenhängen. Während eines (astronomisch kurzen) Menschenlebens ansonsten kaum möglich, geben uns diese Phänomene die faszinierende Möglichkeit, Sternentwicklung in Echtzeit zu verfolgen. Daraus ergeben sich spannende Kooperationen zwischen Profi- und Amateur-Astronomen in der Erforschung dieser Entwicklungsstadien.

## Einleitung: Rote Riesen und Überriesen

Die meiste Zeit ihres Daseins verbringen Sterne wie unsere Sonne (Masse  $1-8 M_{\odot}$ ) damit, in ihrem Zentrum Wasserstoff zu Helium zu fusionieren. In dieser Phase befinden sie sich im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD), in dem die Leuchtkraft gegen die Oberflächentemperatur aufgetragen ist, auf der sogenannten Hauptreihe. Der weitere Entwicklungsweg im HRD spiegelt die Veränderungen im Sterninneren wieder: Wenn nach hunderten Millionen oder Milliarden Jahren der Brennstoffvorrat im Zentrum zur Neige geht, beginnt der Stern sich aufzublähen. Seine Leuchtkraft nimmt zu, die Temperatur ab, und er bewegt sich das erste Mal auf den Roten Riesenast. An der Spitze des Roten Riesenastes zündet im Zentrum die Fusion von Helium.

Der Stern verbringt wiederum für einige hundert Millionen Jahr eine relativ „ruhige“ Zeit am Horizontalast. Wenn auch das Helium im Zentrum weniger wird, bläht sich der Stern ein weiteres Mal zum Roten Riesen auf; dann spricht man vom sogenannten asymptotischen Riesenast (AGB, vom englischen *asymptotic giant branch*). Die Leuchtkraft von AGB-Sternen erreicht einige tausend bis gut zehntausend Sonnenleuchtkräfte. Der innere Aufbau der Sterne in dieser Phase ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Praktisch alle Sterne in der AGB-Phase sind pulsationsveränderlich. Sie sind halbregelmäßige Veränderliche oder Mira-Sterne und somit Objekte von hohem Interesse für Veränderlichenbeobachter. Bekannte Objekte dieser Klasse sind z.B.  $\alpha$  Ceti – der Prototyp der Mira-Klasse – und  $\chi$  Cygni.

In diesem Artikel werden die Begriffe Rote Riesen und AGB-Sterne der Einfachheit halber synonym verwendet, obwohl AGB-Sterne nur eine Teilmenge der Roten Riesen sind. (Andere bekannte Sterne wie Arkturus oder Aldebaran gehören zur anderen Teilmenge am ersten Roten Riesenast.) Es soll aber als Abgrenzung von den Roten Überriesen dienen, die im Folgenden beschrieben werden.

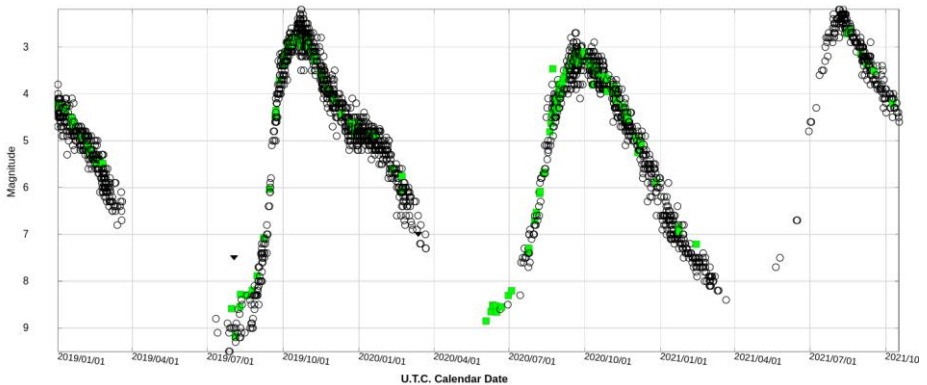


**Abb. 1:** Nicht maßstabsgetreuer Schnitt durch einen AGB-Stern: Im Zentrum sitzt der Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff, der Vorläufer des späteren Weißen Zwergs. Darüber befinden sich die Helium-Brennschale, die Wasserstoff-Brennschale und die H-reiche Hülle. Während der Kern etwas größer als die Erde ist, hat die Hülle einen Durchmesser so groß wie die Erdumlaufbahn um die Sonne (Quelle: NAOJ).

Noch schwerere Sterne von  $8-35 M_{\odot}$  beginnen ihr Dasein ebenfalls auf der Hauptreihe mit dem Brennen von Wasserstoff zu Helium. Da sie ihren Brennstoffvorrat sehr rasch aufbrauchen, halten sie sich dort nur kurz auf, einige zehn Millionen Jahre, bevor sie sich zum Roten Überriesen entwickeln. Sie leuchten auch auf der Hauptreihe schon sehr hell, sodass sich ihre Leuchtkraft auf dem Entwicklungsweg im HRD zu niedrigeren Temperaturen nicht so stark ändert wie bei den masseärmeren Sternen. In der Phase des Roten Überriesen haben die Sterne ca. 100.000 Sonnenleuchtkräfte, also etwa einen Faktor 10 heller als AGB-Sterne. Da die Fusion in ihrem Zentrum nicht beim Kohlenstoff zum Erliegen kommt, sondern weiter bis zum Eisen geht, ist ein weiterer Unterschied zu AGB-Sternen, dass sie ihr Dasein nicht gemächlich, sondern sehr spektakulär in einer Supernova-Explosion beenden. Bevor es soweit kommt, sind auch Rote Überriesen pulsationsveränderlich, hauptsächlich halbregelmäßig. Bekannte und leicht zu beobachtende Vertreter der Roten Überriesen sind Beteigeuze ( $\alpha$  Orionis) und Antares ( $\alpha$  Scorpii).

Folgende vier Charakteristika bzw. Prozesse zeichnen Rote Riesen und Überriesen aus: 1. Veränderlichkeit, 2. Elemententstehung (auch Nukleosynthese genannt), 3. interne Mischprozesse, und 4. Massenverlust in Form von Sternwinden.

Durch ihre **Veränderlichkeit** sind AGB-Sterne und Rote Überriesen auch über große Distanzen in unserer Galaxis und darüber hinaus leicht zu identifizieren. Halbregelmäßige Veränderliche haben Perioden von einigen zehn bis wenige hundert Tage. Definitionsgemäß bleibt ihre Amplitude im V-Band unter 2,5 mag. Veränderliche, die diese Amplitude (oft deutlich) überschreiten, gehören laut Definition der Mira-Klasse an. Sie haben Perioden von gut 100 bis 600 Tagen, in extremen Fällen auch über 1000 Tagen. Die Veränderlichkeit geht auf Schwingungen (Pulsationen) der äußeren Sternschichten zurück, die Temperatur- und Radiusänderungen hervorrufen. Eine typische Lichtkurve eines Mira-Veränderlichen ist in Abbildung 2 wiedergegeben. Die Amplitude von Miras ist so groß, dass visuelle Helligkeitsschätzungen eine völlig ausreichende Genauigkeit haben, um die Periode präzise zu bestimmen.



**Abb. 2:** Lichtkurve von o Ceti, dem Prototyp der Mira-Klasse, zwischen Januar 2019 und Oktober 2021. Grüne Symbole repräsentieren photometrische Messungen im V-Band, offene Kreise stehen für visuelle Schätzungen. Der Stern hat eine Amplitude von 6 mag und eine Periode von  $\sim 330$  Tagen – ganz typische Werte (Quelle: AAVSO).

Die **Nukleosynthese** geschieht in Roten Riesen und Überriesen nicht nur durch die Kernfusion, die die primäre Energiequelle der Sterne darstellt, sondern auch durch weitere Kernprozesse. Dazu gehören v.a. sogenannte Neutroneneinfangprozesse, durch die auch Elemente schwerer als Eisen, also z.B. Gold, Blei und Technetium, erzeugt werden können. Für diese Prozesse benötigt es ganz spezielle Bedingungen, die zur Freisetzung einzelner Neutronen führen. In AGB-Sternen sind diese Bedingungen durch die quasi-periodischen, explosiven Brennphasen der Helium-Schale, die sogenannten He-Shell-Flashes oder Thermische Pulse, gegeben. In diesem Fall werden die schweren Elemente sehr langsam über Jahrtausende aufgebaut (Stichwort: *slow neutron-capture process* oder s-Prozess). Ein Beispiel, wie Sterne in dieser Phase spektroskopisch identifiziert werden können, ist in Abbildung 5 gezeigt. In Roten Überriesen hingegen laufen Neutroneneinfangprozesse sehr rasch innerhalb von Sekunden im Zuge der Supernova-Explosion ab (Stichwort: *rapid neutron-capture process* oder r-Prozess).

Damit die Produkte der Nukleosynthese vom Inneren an die Oberfläche der AGB-Sterne kommen und dort überhaupt sichtbar werden, müssen noch **Mischprozesse** ablaufen. Auch diese Mischprozesse hängen mit den He-Shell-Flashes zusammen. Computermodelle von Shell-Flashes zeigen, dass zuerst die starke Energiefreisetzung des He-Brennens zu einer Zone im Inneren führt, in der die Energie durch Konvektion transportiert wird und nicht durch Strahlung. Konvektion ist auch die Ursache für die Granulation auf der Sonnenoberfläche: heißes Material steigt auf, kühlt ab und sinkt danach wieder nach unten. Einige Jahrhunderte nachdem diese Konvektionszone in AGB-Sternen wieder zum Erliegen kommt, nimmt die Tiefe der ebenfalls konvektiven Hülle so weit zu, dass sie Regionen im Inneren erreicht, die zuvor durch die flash-bedingte Konvektionszone durchmischt wurden. Somit erfasst sie die dort hinterlassenen Produkte der Nukleosynthese und bringt sie bis an die Oberfläche. Es sind also zwei zeitlich getrennte, aber räumlich (in den Massenschichten) ineinandergreifende Konvektionszonen, die zu diesem Mischprozess führen. In der

Fachliteratur wird er als der *dritte Dredge-up* bezeichnet. Nicht nur die Produkte des schon erwähnten s-Prozesses werden an die Oberfläche gebracht, sondern sehr prominent auch der Kohlenstoff, das Produkt des Helium-Brennens. Durch wiederholte Beimengung von Kohlenstoff in die Sternatmosphäre wird aus einem ursprünglich sauerstoffreichen Stern (Spektraltyp M) im Lauf der Zeit ein kohlenstoffreicher Stern (Spektraltyp C). Sterne vom Spektraltyp S haben nahezu ausgeglichene Verhältnisse von Kohlenstoff und Sauerstoff.

In weiterer Folge verlieren Rote Riesen und Überriesen einen beträchtlichen Teil ihrer Masse wieder an das sie umgebende Weltall. Bei den Supernova-Explosionen der Roten Überriesen geschieht dies sehr spektakulär und offensichtlich. Auch AGB-Sterne erleiden einen **Massenverlust** in Form eines Sternwindes, der jedoch wesentlich gemächlicher und über längere Zeiträume abläuft. Mit Geschwindigkeiten von 10-20 km/s wird das mit neuen Elementen angereicherte Material abgeblasen. Dabei spielen feinste Staubkörnchen, die bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen auskondensieren, eine wesentliche Rolle: Sie nehmen den Strahlungsdruck vom Sternlicht auf, werden dadurch vom Stern weg beschleunigt, kollidieren mit Gasteilchen und „ziehen“ so das Gas mit. Die genauen, mikrophysikalischen und chemischen Details der Staubbildung und des Massenverlustprozesses insgesamt sind jedoch noch wenig verstanden und Gegenstand aktueller, intensiver Forschung. Aufnahmen z.B. mit dem Radioteleskop ALMA zeigen, wie die Staub- und Gashüllen um AGB-Sterne aussehen (<https://www.eso.org/public/news/eso1239/>). Die Massenverlustrate durch den Sternwind übersteigt bald die Rate, mit der nukleares Material innen abgebrannt wird. Der Stern „erodiert“ letztlich also vielmehr von außen als von innen. Wenn die äußere, wasserstoffreiche Hülle ganz abgetragen ist, bleibt als Rest der Weiße Zwergstern über, der keine Energie mehr durch Kernfusion umsetzt und in der Folge langsam auskühlt.

Aufgrund des Massenverlusts sind Rote Riesen und Überriesen auch wichtig für die chemische Entwicklung der Galaxis bzw. des Universums als Ganzes. Die neu gebildeten Elemente gelangen dadurch in die interstellare Materie, aus der sich neue Generationen von Sternen und Planetensystemen bilden.

### **Der Beitrag von Amateurastronomen zur Erforschung Roter Riesen**

Wie können Amateurastronomen heutzutage mit bescheidenen Mitteln zur Erforschung Roter Riesen und Überriesen beitragen? Angesichts von immer größeren, technisch ausgereifteren und teureren astronomischen Observatorien auf dem Erdboden und im Weltall erscheint das beinahe unmöglich. Aber diese Großobservatorien haben ihre Schwächen bzw. blinden Flecken. Viele der naheliegenden und daher in der Vergangenheit bestuntersuchten Objekte dieser Klassen sind für Großobservatorien wie das James-Webb-Teleskop schlicht zu hell. Außerdem ist die Zeit an Großobservatorien viel zu kostbar, um Objekte regelmäßig zu beobachten. Durch Helligkeitsbestimmungen, wie sie von Veränderlichenbeobachtern routinemäßig gewonnen werden, können viel mehr veränderliche Sterne überwacht werden als durch die Arbeit von Profi-Astronomen alleine. So können interessante Objekte für eingehende Beobachtungen mit teuren Instrumenten identifiziert werden. Für viele Pulsationsveränderliche gibt es Lichtkurven, die v.a. aufgrund von Amateurbeobachtungen viele Jahrzehnte oder gar

über ein Jahrhundert zurückreichen. Diese extrem langen Lichtkurven öffnen ein komplett neues Fenster in die Erforschung der Roten Riesen und Überriesen. Das Aufrechterhalten der langen Lichtkurven durch anhaltende Beobachtungen und Meldung bei Organisationen wie der AAVSO und der BAV ist enorm wichtig, denn selbst nach Jahrzehnten mit regelmäßigen Helligkeitsveränderungen halten machen Objekte echte Überraschungen bereit.

Im Folgenden soll darauf eingegangen werden, welche faszinierende Phänomene der Sternentwicklung durch sehr lange Zeitreihen zugänglich werden und wie die Beobachtungsdaten in einem Joint Venture zwischen Profis und Amateuren in der Forschung genutzt werden.

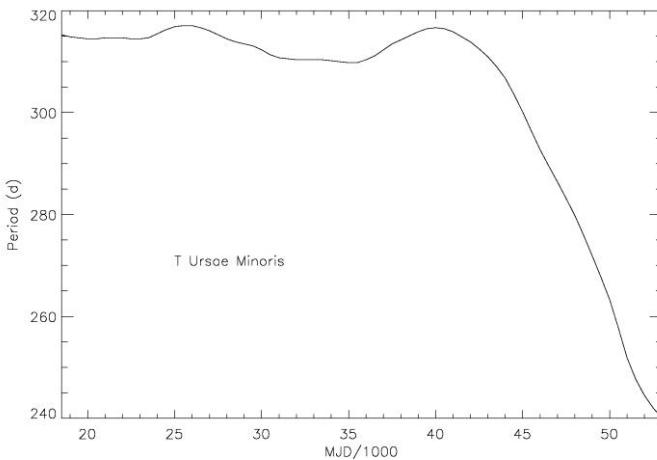
### **Periodenänderung bei Roten Riesen**

Ein sehr schönes Beispiel für solche Überraschungen ist der Mira-Stern T Ursae Minoris (T UMi). Eigentlich sollte man vom *ehemaligen* Mira-Stern sprechen: Hatte der Stern für mehrere Jahrzehnte eine recht stabile Periode von rund 315 Tagen, so begann sie etwa um 1970 herum stark abzunehmen. In den 2000er-Jahren schließlich erreichte T UMi eine so kurze Periode und geringe Amplitude, dass er heutzutage als Halbregelmäßiger zu klassifizieren ist. Abbildung 3 zeigt die aus der AAVSO-Lichtkurve abgeleitete Periodenentwicklung von T UMi. Das Diagramm ist der Studie von Templeton et al. (2005) entnommen und umfasste bereits damals eine über 90 Jahre lange Lichtkurve; heute ist sie schon gut 110 Jahre lang.

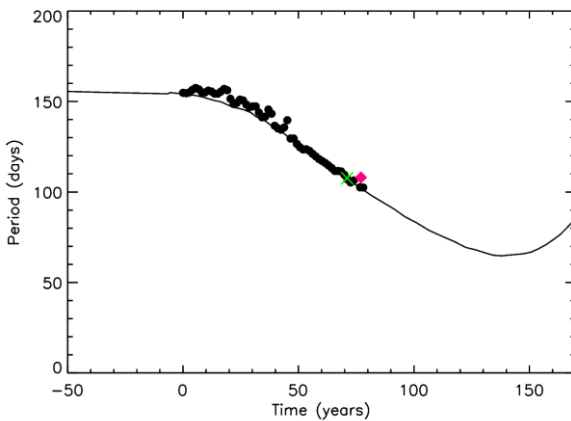
Auch Theoretiker interessieren sich für T UMi und die Helligkeitsbeobachtungen. Eine kürzlich erschienene Studie (Faddeyev 2022) kommt z.B. zum Schluss, dass die Anfangsmasse des Sterns bei ca. 1,3 bis 2,0  $M_{\odot}$  lag und er aktuell (nach Massenverlust) etwa 1,04 bis 1,48  $M_{\odot}$  hat. Es wird spannend sein zu sehen, wie sich der Stern in den nächsten Jahrzehnten entwickelt. Aus dem Zeitpunkt, wenn die Mira-Pulsation wiedereinsetzt, lässt sich mithilfe der theoretischen Modelle nämlich die Masse des Sterns noch besser eingrenzen.

Ein weiteres Beispiel eines Roten Riesen mit einer sich stark ändernden Periode ist RU Vulpeculae (RU Vul), ein Halbregelmäßiger im kleinen Sternbild Fuchs. Die einzelnen Symbole in Abbildung 4 sind Messungen der Periode der Veränderlichkeit, die seit den 1950er-Jahren abnimmt. Die farbigen Symbole sind Periodenbestimmungen aus einer Arbeit des Autors (Uttenhaler et al. 2016a). Die durchgezogene Linie stellt eine Modellrechnung dar, für die der zeitliche Ursprung so gewählt wurde, dass sie mit den Beobachtungen zusammenpasst.

Etwa ein bis zwei Prozent der Roten Riesen zeigen solche Veränderungen ihrer Perioden auf Zeitskalen von Jahrzehnten. Nur mit entsprechend langen Zeitreihen kann man diese Veränderungen tatsächlich feststellen, für welche die unermüdliche Arbeit zahlreicher Amateure unerlässlich ist. Umgekehrt ist es für Amateure spannend zu sehen, wenn sich bei „ihren“ Objekten etwas tut und es Überraschungen gibt.



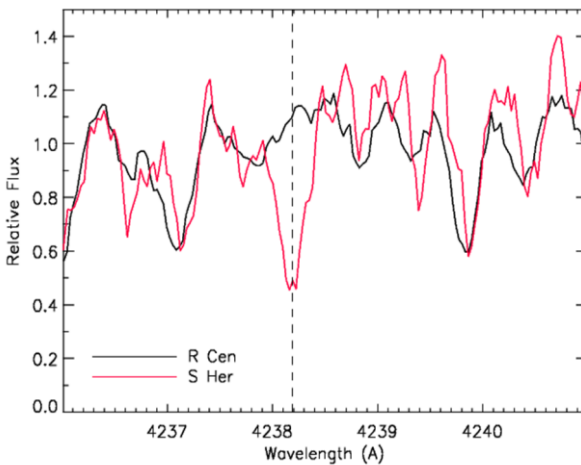
**Abb. 3:** Periodenentwicklung von T UMi zwischen ca. 1910 und 2000. Um etwa 1970 begann die zuvor stabile Periode sehr rasant abzunehmen. Der Stern ist heute ein halbregelmäßig Veränderlicher (Quelle: Templeton et al. 2005).



**Abb. 4:** Periodenentwicklung des Halbregelmäßigen RU Vul. Seit ca. 1950 nimmt seine Periode deutlich ab, ebenso die Amplitude der Veränderlichkeit (Quelle: Uttenthaler et al. 2016a).

Sterne mit sich verändernden Perioden sind von besonderem wissenschaftlichem Interesse. Es erhebt sich die Frage: Was ist die Ursache der Periodenänderung? Die verbreitete Hypothese zu deren Erklärung ist, dass in diesen Sternen ein He-Shell-Flash eingesetzt hat, der zu großen Änderungen in Radius und Leuchtkraft und somit der Periode führen sollte. Der Sternradius kann nur sehr schwer direkt gemessen werden, und selbst die Leuchtkraft (oder ihre Änderung) ist bei Roten Riesen nicht so leicht zu bestimmen, da sie ohnehin sehr stark veränderlich sind und sie das meiste Licht im Infraroten abstrahlen. Eine Helligkeitsänderung im sichtbaren Bereich ist daher nicht sehr aussagekräftig. Der Pulsationsperiode verändert sich jedoch auch mit dem Radius, da sie umgekehrt proportional zur Wurzel aus der mittleren Dichte des Sterns ist, die wiederum mit dessen Volumen, also dem Radius, zusammenhängt. Und die Periode ist leicht und genau zu messen.

Falls die Periodenänderung tatsächlich mit einem He-Shell-Flash zusammenhängt, könnte man annehmen, dass diese Sterne auch Produkte der Nukleosynthese an der Oberfläche zeigen, denn auf einen He-Shell-Flash sollte auch eine tiefe Durchmischung (dritter Dredge-up) folgen. Ein besonderes Produkt der Nukleosynthese ist das Element Technetium (Tc), welches die Ordnungszahl 43 trägt und ausschließlich radioaktiv instabile Isotope hat. Für uns Menschen ist dieses Element vor allem aufgrund seiner Anwendung in der Nuklearmedizin wichtig, z.B. für die Bilderstellung von schwer zugänglichen Tumoren. Das langlebigste Technetium-Isotop, das durch den s-Prozess in Roten Riesen aufgebaut werden kann, ist  $^{99}\text{Tc}$  mit einer Halbwertszeit von ca. 200.000 Jahren. Das ist lange genug, um in einem AGB-Stern im Laufe der Zeit durch mehrfache Dredge-up-Ereignisse angereichert zu werden, aber kurz genug, dass es nicht seit Anbeginn des Sterns vorhanden sein kann; längst wäre alles zerfallen, was an Tc bei der Geburt des Sterns da war. Wenn es in einem Stern vorgefunden wird, ist es ein sicheres Zeichen, dass in seinem Inneren aktuell Nukleosynthese abläuft und ihre Produkte durch den Dredge-up an die Oberfläche kommen. Die Entdeckung von Tc-reichen Roten Riesen durch Paul Merrill (1952) war wissenschaftsgeschichtlich bedeutsam, da sie ein Nachweis dafür war, dass die Nukleosynthese nicht ausschließlich kurz nach dem Urknall passiert ist. Beispiele für je einen Tc-armen und einen Tc-reichen Stern sind in Abbildung 5 gezeigt.

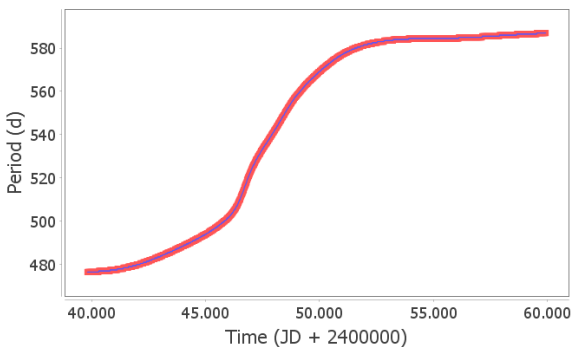


**Abb. 5:** Spektren der beiden Miras R Cen und S Her um eine Absorptionslinie von Tc. Die Laborwellenlänge der Linie ist durch die vertikale, gestrichelte Linie angedeutet. Die ansonsten recht ähnlichen Spektren unterscheiden sich an dieser Stelle klar: Während S Her eine Absorption hat (Tc-reich), fehlt sie in R Cen (Tc-arm; Quelle: García-Hernández et al. 2013).

Zeigen nun die beiden genannten Roten Riesen T UMi und RU Vul Anzeichen von Nukleosynthese? Sind sie Tc-reich und ist die Periodenabnahme eine Folge eines Flashs der Heliumbrennschale bzw. eines Dredge-ups? Dieser Frage wurde in Uttenthaler et al. (2011) nachgegangen. Die etwas überraschende Antwort ist, dass diese beiden Sterne keine Spur von Tc zeigen. Für T UMi wurde das mit einer erneuten Beobachtung im Jahr 2022 bestätigt. Das bedeutet zwar nicht, dass ein He-Shell-Flash als Ursache ausgeschlossen werden kann, da Entwicklungsmodelle vorhersagen, dass die ersten Shell-Flashes am AGB noch zu schwach ausfallen, um

einen Dredge-up zur Folge zu haben. Die in Abbildung 4 gezeigte Modellrechnung eines He-Shell-Flashes gibt die beobachtete Periodenentwicklung von RU Vul dennoch erstaunlich gut wieder. Vermutlich ist genau das der Fall: Ein Shell-Flash ist der Auslöser für die beobachtete Periodenabnahme, aber diese beiden Sterne sind noch in einer vergleichsweise frühen Phase am AGB, wo die Shell-Flashes noch nicht so stark ausfallen. Oder wir müssen einfach noch ein paar hundert Jahre warten, bis auch der anschließende Dredge-up einsetzt und sichtbar wird.

Es gibt auch Rote Riesen, die in der Vergangenheit einen sehr starken Anstieg ihrer Periode gezeigt haben. Ein Beispiel dafür ist der Mira LX Cygni. Von den späten 1970er-Jahren bis Mitte der 1990er-Jahre hat seine Periode von etwa 470 auf 590 Tage stattlich zugenommen. Seine Periodenentwicklung ist in Abbildung 6 gezeigt.



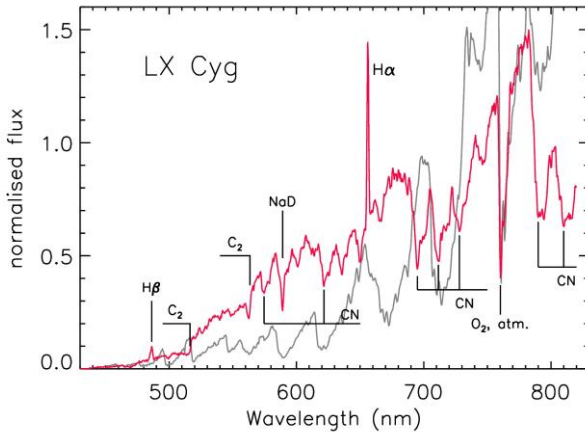
**Abb. 6:** Periodenentwicklung von LX Cygni seit ca. 1968, während des starken Anstiegs über die letzten Jahrzehnte (Quelle: P. Merchan-Benitez, persönliche Mitteilung).

Die Literatur und eigene spektroskopische Aufnahmen zeigen, dass LX Cyg parallel zur Periodenverlängerung auch eine starke spektrale Veränderung durchgemacht hat: Wurde er zwischen den 1950er- und 1970er-Jahren durchwegs als Typ S klassifiziert (d.h., er hatte ein ausgeglichenes Verhältnis von Kohlenstoff zu Sauerstoff), so hat er zumindest seit 2011 das Spektrum eines Kohlenstoffsterns (Typ C). Er zeigt also an seiner Oberfläche sehr deutliche Spuren der Nukleosynthese. Ein Spektrum von LX Cyg, aufgenommen 2012 an der Wiener Universitätssternwarte, ist in Abbildung 7 gezeigt. Die Positionen von Banden kohlenstofftragender Moleküle sind eingezeichnet, ebenso die H $\alpha$ - und H $\beta$ -Linie. Zum Vergleich zeigt die graue Kurve dahinter ein Spektrum eines sauerstoffreichen Roten Riesen: Die Molekülbanden in dessen Spektrum sind bei ganz anderen Wellenlängen und haben ganz andere Formen!

Die wahrscheinlichste Hypothese zur Erklärung sowohl des Periodenanstiegs als auch der spektralen Veränderung ist ein kürzlich stattgefundenes Dredge-up-Ereignis, das so viel Kohlenstoff in die Atmosphäre von LX Cyg gemischt hat, dass er soeben erst zum kohlenstoffreichen Stern wurde. Das neue Molekülgleichgewicht in der Atmosphäre könnte einen Feedback-Effekt ausgelöst haben, sodass der Sternradius und somit die Periode zugenommen haben. Das nachgewiesene Vorhandensein von Tc in diesem Stern wie auch in einem ganz ähnlich gelagerten Fall (BH Crucis) belegt, dass Dredge-up stattgefunden haben muss. In diesen seltenen Objekten können wir vermutlich Sternentwicklung quasi in Echtzeit verfolgen. Kohlenstoff ist ein für Leben



wie wir es kennen essentielles Element und Sterne wie LX Cyg erzeugen es aktuell in großen Mengen.



**Abb. 7:** Spektrum von LX Cyg, aufgenommen an der Wiener Universitätssternwarte (rot). Wellenlängen von Banden kohlenstoffreicher Moleküle sind markiert. In Grau eingezeichnet ist zum Vergleich das Spektrum eines sauerstoffreichen Sterns (Quelle: Utenthaler et al. 2016b).

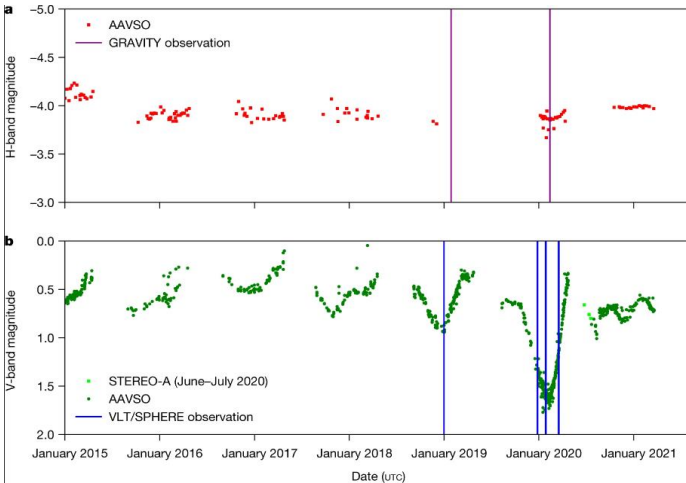
Neben Miras, die eine Periodenänderung in nur eine Richtung zeigen (Abnahme oder Zunahme), gibt es auch Exemplare, deren Periode abwechselnd um etliche Prozent zu- und wieder abnimmt. Hier spricht man von mäandrierenden Perioden. In einer kürzlich bei *Astronomy & Astrophysics* eingereichten Arbeit haben wir uns diese Klasse genauer angesehen (Merchan-Benitez et al. 2023). Interessanterweise sind viele Miras mit mäandrierenden Perioden Tc-reich. Wir konnten Hinweise finden, dass dieses Phänomen eventuell ebenfalls mit He-Shell-Flashes zusammenhängen könnte. Miras überraschen also nicht nur mit plötzlich abfallenden oder ansteigenden Perioden, sondern auch durch ein sanftes Auf und Ab.

### Beteigeuze „Great Dimming“

Faszinierende Phänomene zeigen auch Rote Überriesen, und Amateure können zu deren Erforschung essentiell beitragen. Das Paradebeispiel dafür ist das *Great Dimming* unseres liebsten Roten Überriesen, dem Beteigeuze. Mit einer Entfernung von gut 700 Lichtjahren ist Beteigeuze der uns zweitmächtigste Rote Überriese. Als er Anfang des Jahres 2020 überraschend stark an Helligkeit abnahm, machten schnell Spekulationen die Runde, dass es Vorboten einer bevorstehenden Supernova-Explosion sein könnten. Profi- wie Amateurastronomen richteten ihre Instrumente und Augen auf den Stern. Beteigeuze kehrte bald wieder zur ursprünglichen Helligkeit zurück, auf die Supernova müssen wir (wahrscheinlich noch lange) warten.

Um das *Great Dimming* zu untersuchen und besser zu verstehen, greifen Profi-Astronomen auch in diesem Fall auf Helligkeitsschätzungen zurück, wie sie von Amateuren gewonnen werden. Montargès et al. (2021) berichten über ihre hochaufgelösten Beobachtungen mit unterschiedlichen Instrumenten am *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte in Chile. Die Abbildung 8 ist dieser Arbeit

entnommen und zeigt anhand von (vorwiegend) AAVSO-Daten, zu welcher Phase des *Great Dimmings* die VLT-Beobachtungen gemacht wurden. Ohne das praktisch durchgehende Monitoring durch Amateure wäre eine solche Einordnung so gut wie unmöglich und sogar Publikationen im Journal *Nature* kommen nicht ohne sie aus.



**Abb. 8:** Lichtkurve von Beteigeuze im H-Band (oben) und im V-Band (unten) rund um das Great Dimming. Die Daten stammen vorwiegend von der AAVSO. Die Zeitpunkte der VLT-Beobachtungen sind durch vertikale Linien markiert (Quelle: Montargès et al. 2021).

Damit ist aber mit Amateurdaten noch nicht Schluss in dieser Arbeit: Anhand einer 100 Jahre langen visuellen Lichtkurve von Beteigeuze wird gezeigt, dass es sich bei diesem *Great Dimming* tatsächlich um ein Jahrhundertereignis handeln dürfte. Ohne regelmäßige Beobachtungen ließe sich nicht sagen, wie häufig solche Helligkeitseinbrüche sind.

Die Arbeit der Berufsastronomen zielt darauf ab, zu klären, welche Hypothese für die Helligkeitsabnahme die zutreffende ist. Die beiden wichtigsten Hypothesen sind eine Temperaturabnahme und die Bildung einer Staubwolke vor Beteigeuze. Montargès et al. (2021) kommen zum Schluss, dass sogar beides der Fall sein könnte: Temperaturabnahme in einer großen Region der Photosphäre, gefolgt von dadurch begünstigter Staubbildung in der zirkumstellaren Hülle. In jedem Fall hat sich die Oberfläche von Beteigeuze nicht gleichmäßig abgedunkelt, die südliche Hemisphäre war viel stärker von der Helligkeitsabnahme betroffen als die Nordhemisphäre. Das *Great Dimming* könnte eine Phase mit besonders hohem und auch inhomogenem Massenverlust gewesen sein.

### Fazit

Die Faszination für pulsationsveränderliche Rote Riesen und Überriesen konnte hoffentlich in den vorangegangenen Abschnitten vermittelt werden. Sie geben uns in einigen Fällen die seltene Möglichkeit, im Laufe eines (astronomisch kurzen) Menschenlebens Sternentwicklung in Echtzeit zu verfolgen. Entscheidende Beiträge

für die Erforschung der Phänomene werden trotz modernster Großobservatorien nach wie vor von Amateurastronomen geliefert. Es ist also ein Joint Venture zwischen Amateuren und Profis, wie es sonst selten zu finden ist.

Wer sich selbst an der Beobachtung von Roten Riesen und Überriesen beteiligen möchte, findet in der unten angegebenen Literaturliste reichlich Objekte zur Auswahl, insbesondere in Templeton et al. (2005), Uttenthaler et al. (2011) und Merchan-Benitez et al. (2023). Wer aber lieber eine Überraschung erleben und weniger ausgetrampelte Pfade gehen will, findet auch in jedem anderen Roten Riesen und Überriesen lohnende Objekte.

Der vorliegende Artikel basiert auf einem Vortrag im Rahmen des Monatstreffens der Wiener Arbeitsgemeinschaft für Astronomie, der auf YouTube nachgesehen werden kann: <https://www.youtube.com/watch?v=V8OMkMQnYYU&t=17s>.

## Literatur

Y. A. Fadeyev, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 5996

D. A. García-Hernández, O. Zamora, A. Yagüe, S. Uttenthaler, et al., 2013, Astronomy & Astrophysics, 555, L3

P. Merchan-Benitez, S. Uttenthaler, M. Jurado-Vargas, 2023, Astronomy & Astrophysics, eingereicht

P. W. Merrill, 1952, Astrophysical Journal, 116, 21

M. Montargès, E. Cannon, E. Lagadec, et al., 2021, Nature, 594, 365

M. R. Templeton, J. A. Mattei, L. A. Willson, 2005, The Astronomical Journal, 130, 776

S. Uttenthaler, K. van Stiphout, K. Voet, et al., 2011, Astronomy & Astrophysics, 531, A88

S. Uttenthaler, R. Greimel, M. Templeton, 2016a, Astronomische Nachrichten, 337, 293

S. Uttenthaler, S. Meingast, T. Lebzelter, et al., 2016b, Astronomy & Astrophysics, 585, A145

Stefan Uttenthaler, Institut für Angewandte Physik, TU Wien, Wiedner Hauptstraße 8  
10, 1040 Wien, stefan.uttenthaler@gmail.com