

# Delta Cephei

## Wie ein Stern pulsiert

Seit Jahrhunderten ist bekannt, dass die Helligkeit von Delta Cephei periodisch schwankt. Die Ursache liegt darin, dass sich die Sternatmosphäre ausdehnt und anschließend wieder schrumpft. Entsprechende Beobachtungen lassen sich heutzutage auch mit amateurastronomischen Mitteln durchführen. Zwei Sternfreunde begeben sich auf die Spuren der modernen Forschung.

Von Lothar Schanne und Berthold Stober

**D**elta Cephei ( $\delta$  Cep) ist der Prototyp einer berühmten Klasse veränderlicher Sterne, der Delta-Cepheiden oder einfach nur Cepheiden. Hierzu gehören Sterne, deren Helligkeiten um bis zu zwei Magnituden auf Grund von Pulsationen schwanken, mit Perioden zwischen einem Tag und 130 Tagen. Der im Sternbild Kepheus schon mit bloßem Auge sichtbare Delta Cephei wurde im Oktober 1784 von dem englischen Amateurastronomen John Goodricke (1764–1786) erstmals als veränderlicher Stern beschrieben. Seine scheinbare Helligkeit variiert zwischen 3,5 und 4,4 mag mit einer Periode von 5,37 Tagen (siehe SuW 7/2015, S. 72). Später fanden die Astronomen noch viele solcher Sterne, die ihre Helligkeit in einem charakteristischen Rhythmus ändern, jeder mit seiner eigenen Periode.

Die wahre Bedeutung der Delta Cepheiden erwies sich jedoch erst im Jahr 1912, als die US-amerikanische Astronomin Henrietta Swan Leavitt (1868–1921) die berühmte Perioden-Leuchtkraft-Beziehung entdeckte: Die mittlere Leuchtkraft

der Delta Cepheiden ist umso größer, je länger die Periodendauer ihrer Helligkeitsschwankung ist. Die Beobachtung der Periodendauer lässt somit auf die wahre Helligkeit und die Leuchtkraft dieser Sterne schließen. Aus deren Vergleich mit ihrer scheinbaren Helligkeit ergibt sich die Entfernung. So wurde es möglich, große Distanzen innerhalb unseres Milchstraßensystems und zu benachbarten Galaxien relativ genau zu ermitteln (siehe SuW 12/2019, S. 76).

Zudem ist heute bekannt, dass die Helligkeitsschwankungen der Delta Cepheiden durch eine regelmäßige Größenänderung dieser Sterne verursacht werden, dass sie sich also in einem definierten Rhythmus ausdehnen und anschließend wieder schrumpfen. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz wächst die Strahlungsleistung  $L$  mit der Temperatur  $T_{\text{eff}}$  und der strahlenden Oberfläche  $A$  gemäß  $L = \sigma A T_{\text{eff}}^4$ . Hierbei ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante mit  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J/m}^2 \text{ K}^4$ . Die Oberfläche  $A = 4\pi R^2$  eines kugelförmig angenommenen, sich ausdehnenden Sterns wächst

demgemäß quadratisch mit der Vergrößerung des Sternradius  $R$ . Damit wächst die in Richtung des Beobachters abgegebene Strahlungsleistung: Der Stern erscheint heller. Kühlt sich dabei die Oberfläche des Sterns gleichzeitig ab, wird die pro Flächeneinheit abgestrahlte Lichtleistung mit der vierten Potenz der Temperatur vermindert: Der Stern erscheint dunkler. In der beobachteten Änderung der scheinbaren Helligkeit eines variablen Sterns äußern sich also sowohl eine Änderung des Sternradius als auch eine Temperaturänderung der Sternoberfläche. Auf welche Weise sich diese beiden Effekte trennen lassen, zeigen wir im weiteren Verlauf des Artikels.

Wie können wir die Pulsationen von Delta Cephei nun nachweisen? Schließlich zeigen selbst die leistungsfähigsten Teleskope diesen Stern nur als Lichtpunkt. Die Antwort hierauf – und auf weitere Fragen nach den physikalischen Eigenschaften – liefert die Zerlegung seines Lichts in ein Spektrum und die detaillierte Untersuchung der darin auftretenden Spektrallinien.



$\gamma$  Cep

$\beta$  Cep

$\zeta$  Cep

$\alpha$  Cep

$\mu$  Cep

$\delta$  Cep

10 Grad

### Berühmter Veränderlicher

Delta Cephei im Sternbild Kepheus (lateinisch: Cepheus) ist seit dem 18. Jahrhundert als veränderlicher Stern bekannt. Wegen seiner günstigen, weit nördlichen Himmelsposition und seiner regelmäßigen Helligkeitsschwankungen eignet er sich als erstes Beobachtungsziel für alle, die sich eingehender mit veränderlichen Sternen beschäftigen möchten. Ein variabler Konkurrent in diesem Sternbild ist der ebenfalls sehr populäre Überriese My Cephei ( $\mu$  Cep), der wegen seiner auffallend rötlichen Farbe den Beinamen »Herschels Granatstern« trägt.

## Spektroskopische Beobachtungen

Wie bei vielen kosmischen Bewegungs- phänomenen, die sich mit Hilfe spektros- kopischer Messungen nachweisen lassen, kommt man damit auch der Radiusände- rung eines Sterns auf die Schliche (siehe SuW 7/2010, S. 68). Entscheidend ist hier- bei die Nutzung des Dopplereffekts: Wenn sich der Stern ausdehnt, bewegt sich sei- ne leuchtende Oberfläche, die Photosphä- re, radial – also in Blickrichtung auf den Beobachter zu – weshalb sich das Spek- trum mitsamt aller Linien um einen be- stimmten Wellenlängenbetrag nach links, in Richtung des blauen Spektral- bereichs, verschiebt. Die Wellenlängen erscheinen mithin durch den Doppler- effekt verkürzt. Schrumpft der Stern hin- gegen, dann bewegt sich seine Oberflä- che radial vom Betrachter weg. In diesem Fall erfolgt die Verschiebung zu größeren Wellenlängen hin, in Richtung des roten Spektralbereichs. Misst man die Verschie- bung  $\Delta\lambda$  einer Spektrallinie, deren un- verschobene Laborwellenlänge  $\lambda$  bekannt ist, dann lässt sich mittels der (nicht- relativistischen) Dopplerformel leicht die entsprechende Radialgeschwindigkeit  $RV$  berechnen (siehe SuW 7/2010, S. 68):  $RV = (\Delta\lambda / \lambda) \cdot c$ .

Hierbei ist  $c$  die Lichtgeschwindig- keit von rund  $3 \cdot 10^8$  Metern pro Sekun- de. Die Wellenlänge wird in Nanometer oder Ångström angegeben (1 Ångström = 0,1 Nanometer =  $10^{-10}$  Meter).

Heute ist bekannt, dass Delta Cephei radial mit einer Periode von 5,366249 Ta- gen pulsiert, wobei der Durchmesser des Sterns um rund elf Prozent variiert. Er

besitzt den 44,5-fachen Sonnenradius: 44,5 · 696340 Kilometer  $\approx$  31 Millionen Kilometer. Elf Prozent hiervon entspre- chen rund 3,4 Millionen Kilometern. Dementsprechend müsste die Ausdeh- nung beziehungsweise Schrumpfung des Sterns innerhalb einer Periode mit ei- ner mittleren Geschwindigkeit von rund 15 Kilometern pro Sekunde erfolgen.

Somit lassen sich die durch den Dopplereffekt hervorgerufenen Linienver- schiebungen im optischen Sternspektrum auch mit einem Amateurspektrografen nachweisen, der einen typischen Mess- fehler von  $\pm 3$  Kilometern pro Sekunde hat. Hierin bestand die Aufgabe, die wir uns gestellt hatten: die radialen Pulsa- tionen von Delta Cephei und die damit einhergehenden Temperaturschwankun- gen der Photosphäre selbst zu messen. Hierfür nutzten wir einen Gitterspektro- grafen – einen so genannten Échelle- Spektrografen mit dem sich Spektren be- sonders hoher Auflösung gewinnen lassen (siehe SuW 4/2018, S. 64). Das von uns ver- wendete Gerät wird im Astrofachhandel von der französischen Firma Shelyak Ins- truments angeboten; vergleichbare Ergeb- nisse sollten jedoch auch mit anderen am Markt verfügbaren Instrumenten möglich sein, die eine ausreichende spektrale Auf- lösung und Kalibrierungsgenauigkeit be- sitzen.

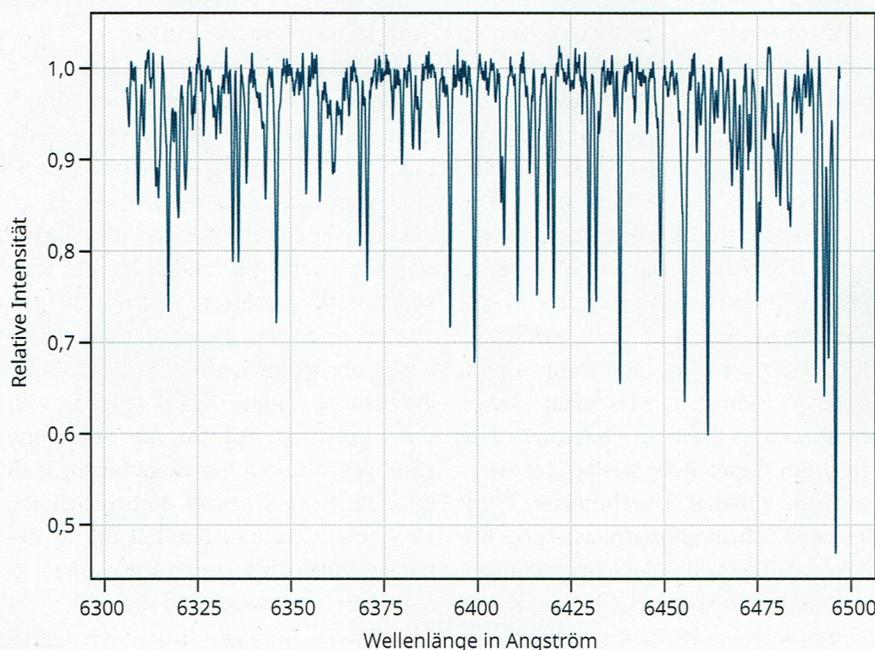
Zur Auswertung kamen 45 Spek- tren, die wir zwischen Februar 2014 und November 2019 aufgenommen haben. Delta Cephei ist ein Stern der Spektral- klasse F5I (siehe SuW 11/2017, S. 48). In den optischen Spektren solcher Sterne

zeigen sich sehr viele Linien unterschied- licher Elemente (siehe »Das Spektrum von Delta Cephei«).

## Nachweis der radialen Pulsation

Die Radialgeschwindigkeiten bestim- men wir auf der Basis der 45 Spektren, die gut ausgebildete Absorptionslinien ent- halten – Linien des neutralen und einfach ionisierten Kalziums (CaI beziehungs- weise CaII), des neutralen und einfach ionisierten Eisens (FeI beziehungswei- se FeII) sowie des einfach ionisierten Si- liziums (SiII): CaI 6439, CaI 6450, CaI 6463, CaI 6472, FeI 6394, FeI 6400, FeI 6412, FeII 6417, FeII 6433, FeII 6456 und SiII 6347. Die nachgestellten Zahlen be- zeichnen die aus der Literatur bekann- ten Laborwellenlängen der Linien in Ång- ström – also diejenigen Werte, die einer Radialgeschwindigkeit von  $RV = 0$  ent- sprechen. Die Wellenlängen der tatsäch- lich beobachteten Linien bestimmten wir anhand der jeweiligen Linienmini- ma durch die Anpassung der Linienform an eine Gaußkurve. Hierfür nutzten wir die von der Europäischen Südstern- warte (ESO) bereitgestellte Auswertungs- software ESO-MIDAS ([www.eso.org/sci/ software/esomididas](http://www.eso.org/sci/software/esomididas)).

Anschließend berechneten wir mit Hilfe der Laborwellenlängen die Doppler- verschiebungen der beobachteten Linien in Ångström und wandelten sie mit der obigen Formel in Kilometer pro Sekunde um. Die so erhaltenen Geschwindigkei- ten wurden nun baryzentrisch korrigiert: Die baryzentrische Korrektur berück- sichtigt die Bewegung der Erde um den



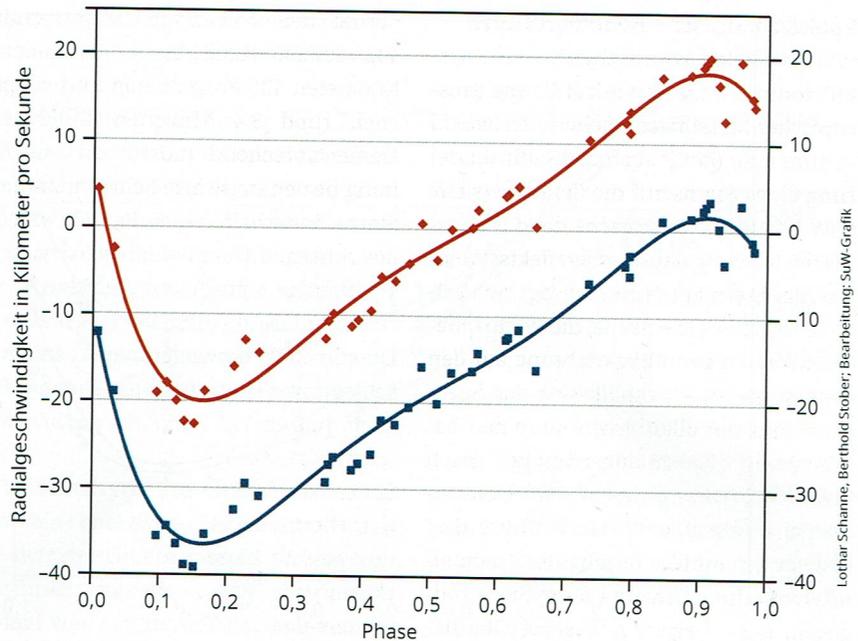
Lothar Schanne, Berthold Stober, Bearbeitung: SuW-Grafik

## Das Spektrum von Delta Cephei

Dargestellt ist ein Ausschnitt aus dem optischen Spektrum im Wellenlängenbereich von 6300 bis 6500 Ångström. Hier finden sich zahlreiche Linien von Kalzium, Eisen und von Silizium. Diese Linien eignen sich für genaue Messungen der Dopplerverschiebungen, die durch die Pulsation des Sterns verursacht werden.

## So pulsiert Delta Cephei

Aufgetragen ist der Verlauf der mittleren Radialgeschwindigkeit  $RV$  der Sternpulsation in Abhängigkeit vom Bruchteil der Periode (Phase). Die gemessenen  $RV$ -Werte (blaue Punkte) wurden anhand der Spektrallinien CaI 6439, CaI 6450, CaI 6463, CaI 6472, FeI 6394, FeI 6400, FeI 6412, FeII 6417, FeII 6433, FeII 6456 und SiII 6347 bestimmt. Rot eingetragen sind die um die Systemgeschwindigkeit von  $-17,6$  Kilometern pro Sekunde korrigierten  $RV$ -Werte. Diese Korrektur berücksichtigt die Bewegung von Delta Cephei relativ zu unserem Sonnensystem. Die Messdaten lassen sich durch die Anpassung eines Polynoms fünften Grades (durchgezogene Kurven) zufriedenstellend beschreiben.



gemeinsamen Schwerpunkt des Erde-Sonne-Systems, das so genannte Baryzentrum. Ebenfalls korrigiert wurde der Einfluss der Erdrotation. Man rechnet den Messwert insgesamt so um, als wäre er von einem hypothetischen Beobachter im Schwerpunkt des Erde-Sonne-Systems, also innerhalb der Sonne, ermittelt worden. Der so erhaltene korrigierte Wert ist unabhängig vom Ort der Messung auf der rotierenden Erde.

Die Mittelwerte der Radialgeschwindigkeiten wurden mit Hilfe der aus der Literatur bekannten Periodendauer der jeweiligen »Phase« der Pulsation zugeordnet. Letztere bezeichnet den Bruchteil der Periode. Beispielsweise entspricht eine Phase von 0,5 einer halben Periodendauer, und eine Phase von 1,0 entspricht der gesamten Dauer von 5,37 Tagen. Das als Diagramm dargestellte Ergebnis lässt eine klare Korrelation zwischen der Pulsationsphase und den beobachteten Radialgeschwindigkeiten erkennen (siehe »So pulsiert Delta Cephei«).

Allerdings ist in den grafisch wiedergegebenen Radialgeschwindigkeiten noch eine weitere Bewegung als Dopplerverschiebung enthalten: die Systemgeschwindigkeit, also die Radialgeschwindigkeit von Delta Cephei als Ganzes bezüglich des Baryzentrums. Sie liegt nach Literaturangaben der astronomischen Datenbank Simbad zwischen  $-24$  und  $-12$  Kilometern pro Sekunde. Wird dieser Einfluss korrekt berücksichtigt, dann muss im Diagramm die Fläche unter dem Kurvenverlauf der negativen Radialgeschwindigkeiten genauso

groß sein wie die Fläche unter der Kurve der positiven Radialgeschwindigkeiten. Der physikalische Grund hierfür ist, dass die gesamte Ausdehnung und die gesamte Schrumpfung des Sterns betragsmäßig gleich groß sein müssen, damit der Stern nach einer vollen Pulsationsperiode wieder den gleichen Durchmesser aufweist. Hierbei wird angenommen, dass der Stern sphärisch symmetrisch pulsiert. Die geforderte Gleichheit der Flächen wird erreicht, wenn wir zu den von uns gemessenen Radialgeschwindigkeiten (blaue Kurve) jeweils den Wert von  $17,6$  Kilometer pro Sekunde hinzuzählen (rote Kurve). Wir haben damit die Systemgeschwindigkeit unabhängig zu  $-17,6$  Kilometer pro Sekunde bestimmt, was dem häufigsten Literaturwert befriedigend ähnelt.

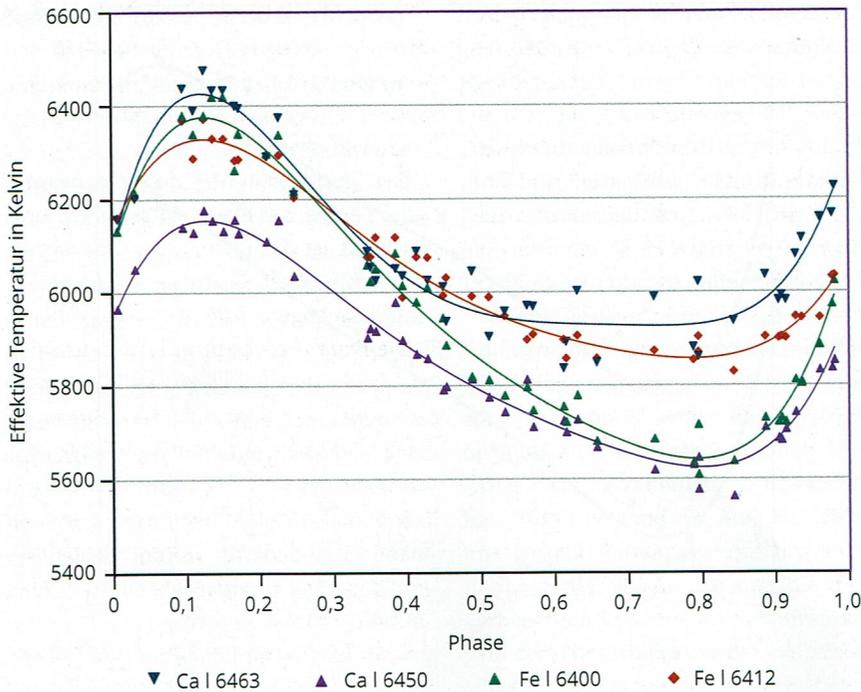
Die so berechnete rote Kurve zeigt nun tatsächlich nur noch die Expansions- beziehungsweise Schrumpfgeschwindigkeiten von Delta Cephei während seiner Pulsationen. Nahe der Phase 0 (genauer: bei 0,02) besitzt der Stern seinen minimalen Durchmesser. Anschließend beginnt er, beschleunigt zu expandieren ( $RV$  negativ) und erreicht bei Phase 0,15 seine maximale Expansionsgeschwindigkeit von  $-20$  Kilometern pro Sekunde. Dann nimmt die Expansionsgeschwindigkeit langsam ab und erreicht bei Phase 0,53 den Wert 0: An dieser Stelle besitzt der Stern seinen maximalen Durchmesser. Nun folgt seine Schrumpfungphase (positive  $RV$ -Werte); die maximale Schrumpfungsgeschwindigkeit von  $+18$  Kilometern pro Sekunde wird bei Phase 0,9 erreicht und

fällt dann schnell bis 0 bei Phase 0,02 ab. Damit hat der Stern wieder seinen minimalen Durchmesser erreicht, und die nächste Pulsationsperiode beginnt.

Die blaue Kurve des Diagramms ist nahezu identisch mit dem entsprechenden Ergebnis aus der wissenschaftlichen Literatur – nur die Streuung unserer Messwerte ist größer. Sie entspricht dem mittleren Fehler unseres Spektrografen von  $\pm 3$  Kilometern pro Sekunde. Unser Hauptziel ist nunmehr erreicht: Wir können belegen, dass sich die Pulsation von Delta Cephei mit einem Amateurspektrografen nachweisen und sogar im Detail untersuchen lässt, in Übereinstimmung mit professionell ermittelten Daten. Doch aus den gemessenen Spektren lassen sich noch mehr Erkenntnisse gewinnen.

### Temperaturschwankungen während der Pulsation

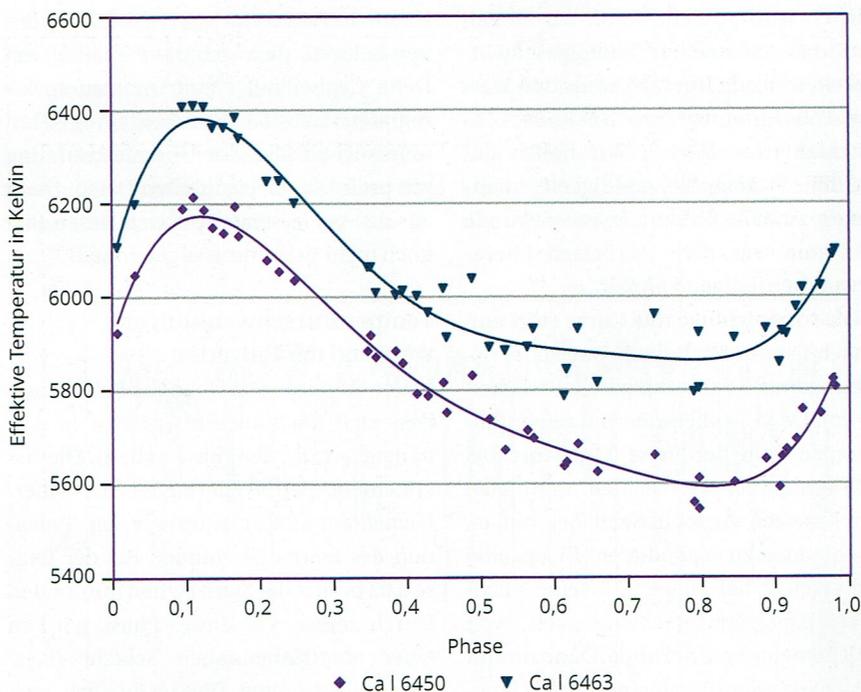
In den Spektren von Delta Cephei fällt auf, dass sich die Linienintensitäten in Abhängigkeit von der Phase ändern. Dies ist systematischen Änderungen der Oberflächentemperatur während der Pulsation des Sterns geschuldet. Bei der Phase 0,02 besitzt der Stern seinen minimalen Durchmesser. Vor dieser Phase wird in einer oberflächennahen Schicht Energie zurückgehalten. Dies ist möglich, weil die betreffende Schicht für bestimmte Lichtwellenlängen nur in geringem Maß durchlässig ist; man sagt, die Schicht habe eine hohe Opazität. Ein Teil der in tiefer liegenden Zonen des Sterns erzeugten Energie wird somit in dieser Schicht gespeichert. Infolge dieses Energiezu-



Lothar Schanne, Berthold Strober; Bearbeitung: SuW-Grafik

### Aufheizung und Abkühlung

Temperaturänderungen in der Photosphäre während des Phasenverlaufs der Pulsation, bestimmt aus Linientiefenverhältnissen. Die eingezeichneten Linien sind Ausgleichskurven, die durch die Anpassung von Polynomen fünften Grades berechnet wurden.



Lothar Schanne, Berthold Strober; Bearbeitung: SuW-Grafik

### Erweiterte Auswertung

Die Temperaturänderungen während des Phasenverlaufs der Pulsation wurden nochmals aus Linientiefen bestimmt, hier aus ihren Verhältnissen zur Bezugslinie des ionisierten Siliziums (Si II) bei 6347 Ångström. Die eingezeichneten Kurven sind Ausgleichskurven, die mittels Polynomen fünften Grades berechnet wurden.

wachses heizt sich die Schicht auf: Druck, Strahlungsdruck und Temperatur steigen, wodurch die Schicht expandiert und die darüberliegenden Gasschichten anhebt – die Pulsation beginnt.

Bis zur halben Pulsationsperiode ist die überschüssige Energie aus der aktiven Schicht entwichen, und die über ihr liegenden äußeren Gasschichten kühlen sich ab. Die den Mechanismus auslösende Gasschicht im Untergrund wird wieder undurchsichtiger: Ihre Opazität steigt an. Der Strahlungsdruck in den äußeren Schichten lässt nach, und der Sterndurchmesser schrumpft wieder auf seinen Minimalwert. Der hier beschriebene Vorgang wird auch als Kappa-Mechanismus bezeichnet, weil er wesentlich auf dem Verhalten jener tieferen Schicht beruht, deren Opazität mit dem griechischen Buchstaben Kappa ( $\kappa$ ) bezeichnet wird.

In der wissenschaftlichen Literatur (Andrievsky et al. 2005) wird das Temperaturmaximum bei Phase 0,05 mit 6500 Kelvin, das Temperaturminimum bei Phase 0,7 mit 5500 Kelvin angegeben. Diese Temperaturen wurden durch das Verfahren der Linientiefenverhältnisse (englisch: line-depth ratios, LDR) ermittelt. Dabei setzt man die Linientiefen von stark temperaturabhängigen Linien neutraler Atome mit den weniger temperaturabhängigen Linientiefen von einfach ionisierten Metallen – meist Eisen (Fe II) – ins Verhältnis. Diese Vorgehensweise bietet gegenüber fotometrischen Methoden den Vorteil, dass die entfernungs- und wellenlängenabhängige Rötung, die das Licht auf seinem Weg zur Erde erfährt, keine Rolle spielt, sofern man benachbarte Linien zur Auswertung heranzieht, deren Wellenlängen sich nicht sehr voneinander unterscheiden.

Um das LDR-Verfahren auf unsere Spektren von Delta Cephei anzuwenden, wurden ELODIE-Spektren (<http://atlas.obs-hp.fr/elodie>) von 34 Sternen herangezogen, deren effektive Temperaturen  $T_{\text{eff}}$  recht genau bekannt sind (Kovtyukh, 2007) und zwischen 4050 und 7392 Kelvin liegen. Die in der Literatur publizierten Spektren wurden mittels eines von uns selbst geschriebenen Python-Programms auf die Auflösung unseres Spektrografen ( $\lambda / \Delta\lambda = 10000$ ) umgerechnet und auf das Kontinuum normiert. In diesen Spektren wurden mittels des MIDAS-Befehls »center/gauss« die Linientiefen der stark temperaturabhängigen Linien des neutralen Eisens (Fe I) sowie des neut-

ralen Kalziums (CaI) gemessen: FeI 6400, FeI 6412, CaI 6463 und CaI 6450.

Des Weiteren wurde die wenig temperaturabhängige Linie des einfach ionisierten Eisens (FeII) bei 6417 Ångströmgemessen und damit die Linien-Verhältnisse berechnet, zum Beispiel der Quotient  $LDR = (\text{Linientiefe FeI } 6400) / (\text{Linientiefe FeII } 6417)$ . Daraus ergaben sich Eichkurven: die LDR, aufgetragen gegen  $T_{\text{eff}}$ . Genauso ermittelten wir auch in unseren Delta-Cephei-Spektren die Linientiefen, setzten sie ins Verhältnis und rechneten die LDR mittels der Eichkurven, die sich aus den Elodie-Spektren ergaben, in die jeweilige  $T_{\text{eff}}$  um. Auf diese Weise konnten wir die  $T_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit von der Pulsationsphase ermitteln (siehe »Aufheizung und Abkühlung«). Der absolute Temperaturbereich stimmt etwa mit den Literaturangaben (Andrievsky et al. 2005) überein.

Um sich nicht nur auf die mit einer einzigen Bezugslinie gebildeten LDR verlassen zu müssen, wurden zusätzlich die Minima der Linie SiII 6347 in den Elodie-Spektren sowie in den Delta-Cephei-Spektren ausgemessen und die Eichkurven für die stark temperaturabhängigen Linien FeI 6400, FeI 6412, CaI 6463 sowie CaI 6450 erstellt – diesmal mit der

Bezugslinie SiII 6347. Die beste Korrelation im benötigten Temperaturbereich zeigten die Eichkurven von CaI 6463 und CaI 6450. Die Umrechnung der LDR in den Spektren von Delta Cephei für die Linienpaare CaI 6463 / SiII 6347 und CaI 6450,2 / SiII 6347 liefert wiederum die Temperaturverläufe in Abhängigkeit von der Pulsationsphase (siehe »Erweiterte Auswertung«). Sie sind im Rahmen der erreichten Genauigkeit mit den zuvor berechneten Temperaturkurven der beiden Linien identisch.

### Der Atemrhythmus eines Sterns

Aus den effektiven Temperaturen  $T_{\text{eff}}$ , die sich mit Hilfe der sechs ausgewerteten Linien ergaben, wurde der mittlere Verlauf von  $T_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit von der Phase berechnet und zum Vergleich mit den mittleren, um die Systemgeschwindigkeit korrigierten Radialgeschwindigkeiten  $RV$  in einem Diagramm dargestellt (siehe »Temperatur und Pulsation«). Integriert man die Kurven der Expansions- und Schrumpfgeschwindigkeiten über den Zeitraum einer Phase (5,367 Tage), so erhält man die Radiusänderungen des Sterns während der Phasendauer. Das Ergebnis haben wir ebenfalls zusammen mit den ermittelten  $T_{\text{eff}}$ -Werten dargestellt.

Anhand der beiden Diagramme lässt sich die physikalische Zustandsänderung von Delta Cephei im Verlauf der Pulsation folgendermaßen zusammenfassend beschreiben:

- Den geringsten Durchmesser besitzt Delta Cephei bei Phase 0,02. Zu diesem Zeitpunkt ist die Aufheizung der Sternphotosphäre bereits in vollem Gang und noch nicht abgeschlossen.

- Die Expansion beginnt hochbeschleunigt und erreicht bei Phase 0,15 (nach 0,8 Tagen) ihre maximale Ausdehnungsgeschwindigkeit von etwa 18 Kilometern pro Sekunde, wobei der Sternradius bereits um 800 000 Kilometer größer geworden ist. Zum gleichen Zeitpunkt erreicht die Photosphäre ihre höchste Temperatur von 6300 Kelvin.

- Der Nachschub von Energie, die über den Kappa-Mechanismus aufgestaut wurde, hat nun nachgelassen, der Stern beginnt sich oberflächlich abzukühlen, und die Expansionsgeschwindigkeit geht durch die Wirkung der Gravitation zurück, bis sie bei Phase 0,535, also nach weiteren 2,0 Tagen, den Wert null erreicht. Der Stern besitzt nun seine maximale Ausdehnung und geht in den Schrumpfungsprozess über. Bis zu diesem Zeitpunkt ist er um etwa 2,5 Millionen Kilometer ex-

## Steckbrief von Delta Cephei

Delta Cephei ist der Prototyp einer Klasse veränderlicher Sterne. Ihr physikalischer Zustand bedingt eine regelmäßige Pulsation, deren Dauer mit ihrer absoluten Helligkeit verknüpft ist. Diese ist wiederum ein Maß für die Leuchtkraft des Sterns, also seiner Strahlungsleistung, die in Watt gemessen wird. So lassen sich allein durch Messungen der Pulsationsperiode und der scheinbaren Helligkeit die Entfernungen von Delta Cepheiden bestimmen. Deshalb bilden diese Sterne die wohl wichtigsten Standardkerzen zur Messung von Distanzen im Universum.

**Position:** Sternbild Kepheus,  $\alpha = 22\text{h } 29\text{m } 10\text{s}$ ,  $\delta = +58^\circ 24' 55''$

**Helligkeit:** 4,37 bis 3,48 mag

**Periode:** 5,366341 Tage

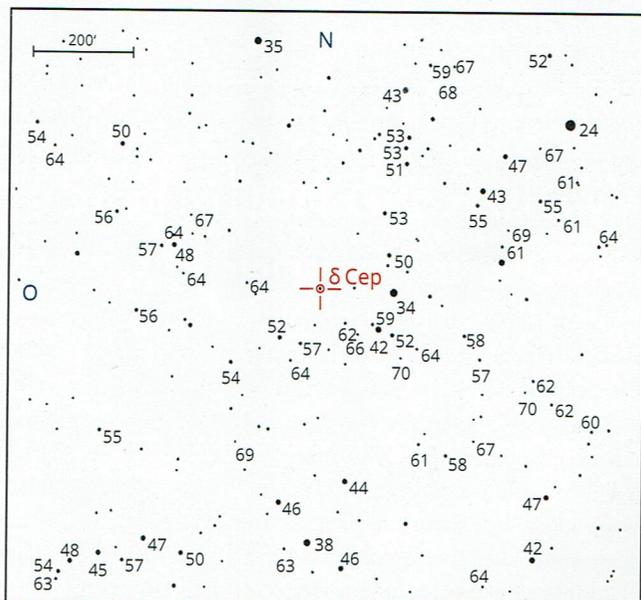
**Entfernung:**  $(887 \pm 26)$  Lichtjahre

**Masse:** rund 4,5 Sonnenmassen

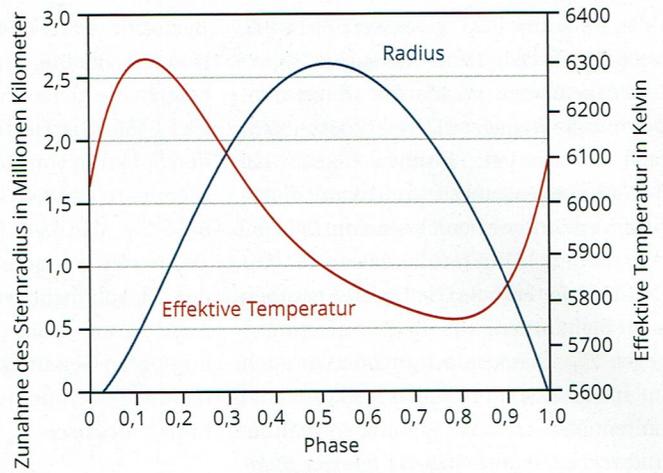
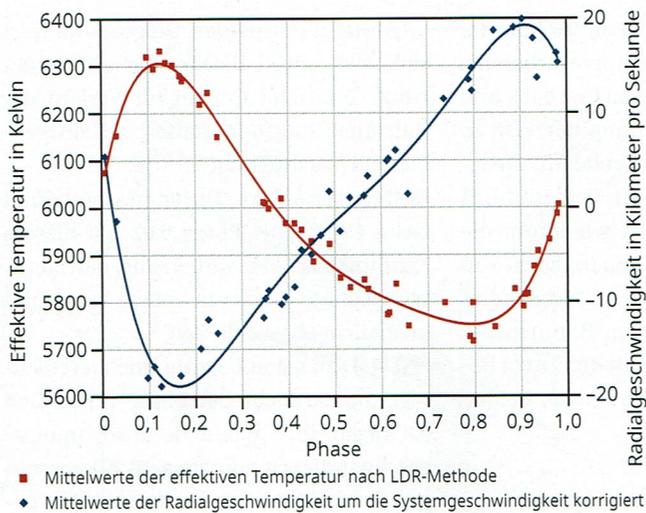
**Spektraltyp:** F5 bis G3

**Alter:** rund 100 Millionen Jahre

Wer Delta Cephei selbst beobachten möchte, findet hier eine Karte mit den Helligkeiten geeigneter Vergleichssterne. Die Helligkeitswerte sind in zehntel Magnituden ohne Komma oder Dezimalpunkt angegeben. Beispielsweise bezeichnet 34 eine scheinbare Helligkeit von 3,4 mag.



**Vergleichssternkarte für Delta Cephei** Die Karte zeigt ein Feld von 20 Grad Kantenlänge um den Cepheiden Delta Cephei ( $\delta$  Cep) im Sternbild Kepheus.



Lothar Schanne, Berthold Stober; Bearbeitung: SuW-Grafik

## Temperatur und Pulsation

Die Kurven zeigen den Verlauf der effektiven Temperatur  $T_{\text{eff}}$  und der um die Systemgeschwindigkeit korrigierten Radialgeschwindigkeiten  $RV$  der Sternpulsation im Vergleich. Dem Verlauf von  $RV$  entspricht eine Radiusänderung des Sterns, die in der Grafik rechts gemeinsam mit der  $T_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit von der Phase dargestellt ist.

pandiert. Dies entspricht 8,1 Prozent seines Radius; die mittlere Ausdehnungsgeschwindigkeit betrug bis dahin etwa elf Kilometer pro Sekunde.

■ Zwischen den Phasen 0,535 und 0,8 kühlt der Stern weiter, aber langsamer ab und erreicht bei Phase 0,8 seine Minimaltemperatur von 5750 Kelvin, während er mit zeitlinear zunehmender Geschwindigkeit schrumpft. Der Zuwachs des Sternradius im Vergleich zum minimalen Wert beträgt zu diesem Zeitpunkt noch 1,6 Millionen Kilometer.

■ Ab Phase 0,8 beginnt eine beschleunigte Aufheizung der Photosphäre infolge der Kontraktion. Vermutlich wird in dieser Phase auch die Opazität der dem Kappa-Mechanismus unterliegenden Gasschicht des Sterns ansteigen; Energie aus dem Innern wird in dieser Schicht gestaut.

■ Die maximale Schrumpfgeschwindigkeit von 19 Kilometern pro Sekunde erreicht der pulsationsveränderliche Stern Delta Cephei bei der Phase 0,91, wobei zu diesem Zeitpunkt die effektive Temperatur um 80 Kelvin auf  $T_{\text{eff}} = 5830$  Kelvin gestiegen ist. Die Radiuszunahme gegenüber dem Minimalwert liegt bei +800 000 Kilometern. Die Geschwindigkeit der Schrumpfung wird anschließend durch die zunehmende Aufheizung und der beginnenden Ausdehnung der dem Kappa-Mechanismus unterliegenden Schicht des Sterns schnell abgebremst und erreicht bei Phase 1,02 – was der Phase 0,02 des darauffolgenden Pulsationszyklus entspricht – den Wert null.

■ Durch die Ausdehnung der dem Kappa-Mechanismus unterliegenden Schicht des Sterns und den Austritt der aufgestauten Energie in die Photosphäre gelangt der Stern bei Phase 0,02 wieder in die Expansionsphase: Der nächste Pulsationszyklus beginnt.

Die beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass auch mit modernen Amateurmitteln, insbesondere mit hochauflösenden Spektrografen, tiefgehende astrophysikalische Erkenntnisse über Himmelskörper gewonnen werden können – hier am Beispiel von periodischen Änderungen des Radius, der Ausdehnungs- beziehungsweise Schrumpfungsgeschwindigkeiten sowie der effektiven Temperaturen der Photosphäre während der Pulsationen des berühmten veränderlichen Sterns Delta Cephei.



**Lothar Schanne** ist Chemiker und Ingenieur für Verfahrenstechnik. Seit 2004 beschäftigt er sich intensiv mit der Spektroskopie von Sternen.



**Berthold Stober** ist Facharzt für Chirurgie und Allgemeinmedizin. Seit seinem 14. Lebensjahr beschäftigt er sich in seiner Freizeit mit Astronomie. Zu seinen Selbstbauprojekten gehören Linsen- und Spiegelsysteme. Sein Hauptinteresse gilt gegenwärtig der Spektroskopie.

## Literaturhinweise

- Andrievsky, S. M. et al.:** Phase-dependent variation of the fundamental parameters of Cepheids. III. Periods between 3 and 6 days. *The Astronomical Journal* 130, 2005
- Eversberg, T.:** Spektroskopische Abenteuer. *Sterne und Weltraum* 7/2012, S. 76 – 84
- Eversberg, T., Vollmann, K.:** Spectroscopic instrumentation. *Fundamentals and guidelines for astronomers*. Springer Verlag, Heidelberg 2015
- Hattenbach, J.:** Delta Cephei, wir kannten dich kaum. *Sterne und Weltraum* 12/2015, S. 20 – 22
- Heeren, P.:** Echelle-Spektrografen: Präzision in Farbe. *Sterne und Weltraum* 4/2018, S. 64 – 72
- Kovtyukh, V. V.:** High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 2007
- Reichert, U.:** Der Delta-Cephei-Stern Delta Cephei. *Sterne und Weltraum* 4/2015, S. 65
- Schanne, L.:** Doppelsternen auf der Spur. *Sterne und Weltraum* 7/2010, S. 68 – 75
- Stober, B.:** Der Mizar-Test: Spektroskopie mit selbst gebautem Gitterspektrografen. *Sterne und Weltraum* 6/2005, S. 64 – 68
- Vollmann, W.:** Veränderliche am PC beobachten: Das Delta-Cephei-Projekt. *Sterne und Weltraum* 7/2015, S. 72 – 76

**Dieser Artikel und Weblinks:**  
[www.sterne-und-weltraum.de/artikel/2047380](http://www.sterne-und-weltraum.de/artikel/2047380)