

Der Blazhko-Effekt von TT Cancri und ein Vergleich mit dem gleichen Phänomen bei UX Trianguli

Herbert Achterberg

Abstract: *Forty years ago Szeidl [1] discovered the Blazhko effect of TT Cnc. The variability of five own recently observed light curves of TT Cnc shows that the Blazhko effect is still existing with about the same extent. A Blazhko period $P_B[d] = 89,10 \pm 0,02$ was derived from 57 (O-C)-values for times of maximum light, which were calculated from photoelectric and ccd observations taken from the GEOS database [2]. This result is valid on the assumption that P_B has not altered from 1968 to 2007. Interestingly, the average course of the (O-C)-values in the Blazhko phase diagram is increasing and decreasing nearly linear and the transitions between rise and fall are rather abrupt, which is very similar to the behaviour of UX Tri [7].*

Der Blazhko-Effekt des RR-Lyrae-Sterns TT Cnc wurde von B. Szeidl 1968 auf der Konkoly-Sternwarte entdeckt [1]. Aus 14 photoelektrischen Maximumbeobachtungen leitete er eine Blazhko-Periode von etwa 89 Tagen (ohne Angaben weitere Dezimalstellen) ab. Da sich seine Beobachtungen nur über 5 Monate von Dezember 1967 bis April 1968 erstreckten, war es damals nicht möglich, die Blazhko-Periode mit einer größeren Genauigkeit zu ermitteln. Szeidl stellte fest, dass mit der angegebenen Periode die Maximumhelligkeit um ca. 0,35 mag schwankte und die (B-R)-Werte der beobachteten Maximumzeiten gegenüber einer angegebenen linearen Ephemeridenformel zwischen -29^m und $+21^m$ variierten.

Seit diesen Beobachtungen sind nun 40 Jahre vergangen und es scheint sinnvoll, den Blazhko-Effekt von TT Cnc einmal genauer zu untersuchen und zu versuchen, die Blazhko-Periode P_B mit einer größeren Genauigkeit zu ermitteln. Aus den Lichtkurven von fünf eigenen CCD-Beobachtungen, deren Verläufe über der Pulsationsphase φ in Bild 1 durch Approximationspolynome dargestellt sind, geht eindeutig hervor, dass die Form der Lichtkurve von TT Cnc veränderlich ist, dass die Maximumhelligkeit um mindestens 0,3 mag schwankt und dass schließlich das Helligkeitsmaximum gegenüber den mit einer quadratischen Ephemeridenformel berechneten Zeitpunkten mehr oder weniger vorseilt oder verzögert auftritt. Diese Beobachtungen zeigen, dass der Blazhko-Effekt von TT Cnc noch vorhanden ist und nur noch die Periodizität dieser Schwankungen durch Ermittlung der Blazhko-Periode P_B nachgewiesen werden muss.

Zur Bestimmung der Blazhko-Periode P_B reichen die erwähnten fünf Beobachtungen nicht aus; dafür sind wesentlich mehr Daten notwendig. In der GEOS-Datenbank [2] sind für TT Cnc 125 beobachtete Zeiten maximaler Helligkeit aufgeführt, die aus photographischen, visuellen, photoelektrischen und CCD-Beobachtungen abgeleitet worden sind. Bei der Benutzung dieser Daten zeigte sich, dass die Genauigkeit zahlreicher dieser Maximumzeiten zur Lösung der anstehenden Aufgabe nicht ausreicht. Bei einer Variationsbreite der (B-R)-Werte von rund $\pm 20^m$ dürfen die Fehler der Maximumzeiten nicht viel größer als $\pm 5^m$ sein, damit der Blazhko-Effekt deutlich genug aus den Streuungen der Daten hervortritt. Bei den sehr flachen Lichtkurven von TT Cnc, die gemäß Bild 1 bei niedrigen Maximumhelligkeiten auftreten, können Fehler in der Helligkeit von nur 0,01 mag, verursacht z.B. von atmosphärischen Störungen, bereits

Abweichungen von etlichen Minuten bei den Maximumzeiten verursachen. Unter diesen Vorgaben ist verständlich, dass sich photographische und visuelle Beobachtungen, bei denen mit Toleranzen in der Größenordnung von 0,1 mag gerechnet werden muss, zur genaueren Untersuchung des Blazhko-Effektes nicht eignen. Aus diesem Grund wurden die Daten der photographischen und visuellen Beobachtungen bei der beabsichtigten Untersuchung nicht verwendet.

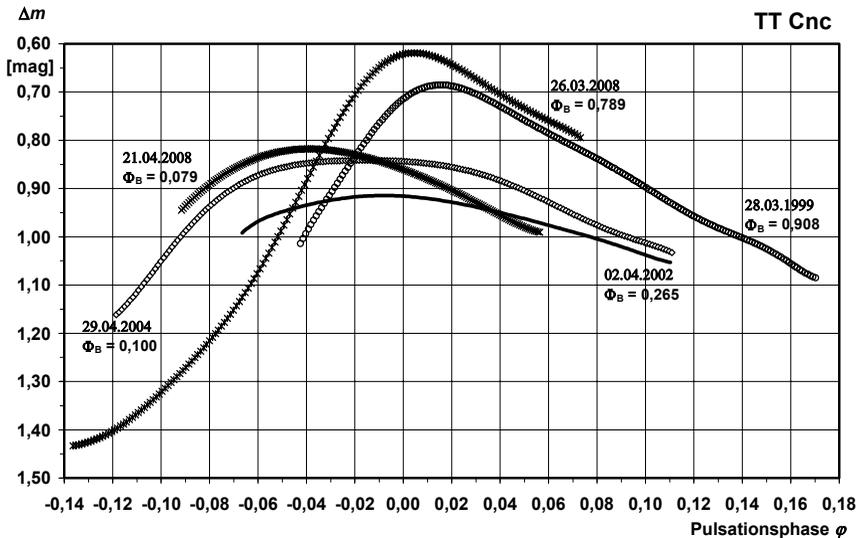


Bild 1. Fünf Lichtkurven von TT Cnc, dargestellt über der Pulsationsphase φ , um die unterschiedliche Lage der Maxima relativ zur Phase $\varphi = 0$ sichtbar zu machen. Zur Berechnung der Pulsationsphase wurde eine quadratische Ephemeridenformel verwendet. In Ordinateurichtung sind die Helligkeiten relativ zum Referenzstern GSC 805:232 angegeben. Dargestellt sind die Approximationspolynome der einzelnen Messserien, bei denen die Verläufe der Lichtkurven, insbesondere im Bereich der zahlreichen Überschneidungen, deutlicher sichtbar werden als bei Angabe von diskreten Messpunkten. Die Zahlenwerte an den Kurven sind Datum und Blazhko-Phase Φ_B der jeweiligen Beobachtung.

Auch einige der photoelektrischen und CCD-Beobachtungen sind zur Untersuchung des Blazhko-Effektes ungeeignet. So enthält die Datenbank auch Beobachtungen, die mit automatischen Teleskopen gemacht wurden. In diesem Falle wird eine Lichtkurve nicht wie üblich in einer Nacht ermittelt, sondern aus einzelnen Helligkeitsmessungen abgeleitet, die sich über einen längeren Zeitraum erstrecken, indem eine Reduktion auf eine Pulsationsperiode vorgenommen wird. Man erhält dann aber nur eine *mittlere* Lichtkurve, die man zur Ableitung der Blazhko-Periode nicht verwenden kann. Dieser Tatbestand betrifft Daten der Projekte Hipparcos, ROTSE und ASAS. Weiterhin gibt es auch bei den photoelektrischen und CCD-Beobachtungen Ausreißer, die die Ermittlung der Blazhko-Periode beeinträchtigen und daher eliminiert werden müssen.

Schließlich zeigen die sechs letzten CCD-Beobachtungen ab März 2007, wie aus Bild 7 hervorgeht, zu kleine $(B-R)$ -Werte, die deutlich unter der Mehrheit der übrigen vom Blazhko-Effekt befreiten Messpunkte liegen. Da diese Beobachtungen von drei unabhängigen Beobachtern stammen, muss man von einem realen Effekt ausgehen, der allerdings durch weitere Beobachtungen noch bestätigt werden muss. Derartige Phänomene können z.B. durch plötzliche Änderungen der Pulsationsperiode hervorgerufen werden, die bei RR-Lyrae-Sternen mehrfach beobachtet worden sind, u.a. beim Blazhko-Stern UX Tri. Die sechs letzten CCD-Beobachtungen wurden daher von der Ermittlung der Blazhko-Periode ausgeschlossen. Letzten Endes standen 57 Maximumzeiten zur Untersuchung des Blazhko-Effektes von TT Cnc zur Verfügung.

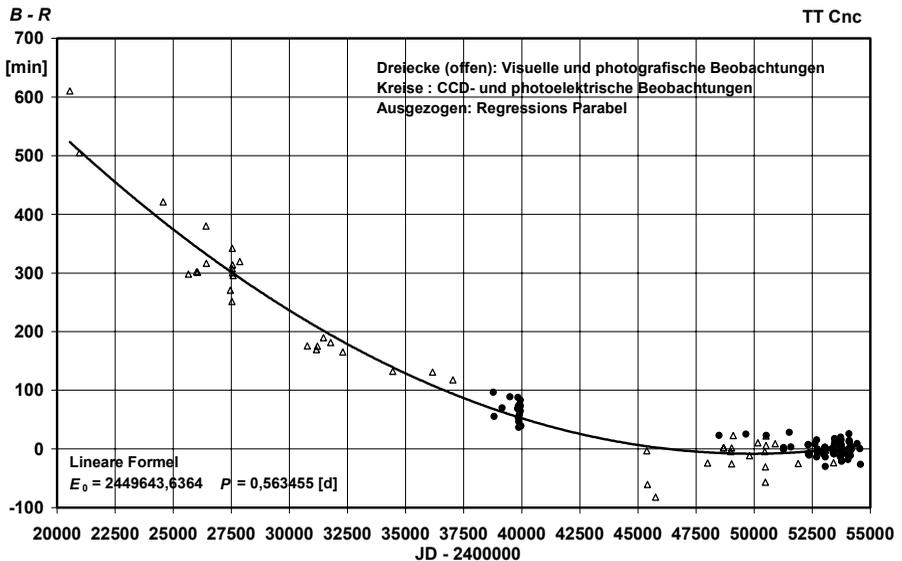


Bild 2. $(B-R)$ -Diagramm aller zur Verfügung stehenden Maximumzeiten der Helligkeit von TT Cnc. Weitere Einzelheiten siehe Text.

Eine Möglichkeit den Blazhko-Effekt eines RR-Lyrae-Sterns zu untersuchen, beruht auf einer Analyse der $(B-R)$ -Werte von Zeiten der Helligkeitsmaxima. Diese Methode wird im Folgenden genauer erörtert. Die beobachteten Werte B der Maximumzeiten werden durch die Auswertung der aufgenommenen Lichtkurven ermittelt und die Rechenwerte R liefert eine Ephemeridenformel. Wenn im Folgenden von $(B-R)$ -Werten die Rede ist, handelt es sich immer um die $(B-R)$ -Werte der Zeiten mit TT Cnc im Helligkeitsmaximum. In Bild 2 ist ein $(B-R)$ -Diagramm von TT Cnc angegeben, in dem alle Maximumzeiten der GEOS-Datenbank sowie zwei noch unveröffentlichte Zeiten einen Datenpunkt liefern. Die Rechenwerte R wurden mit einer linearen Ephemeridenformel ermittelt, deren Elemente in Bild 2 angegeben sind. Die in Richtung Vergangenheit stark ansteigenden $(B-R)$ -Werte lassen sich, wie die in Bild 2 eingezeichnete Regressionsparabel zeigt, durch ein Polynom 2. Grades recht gut darstellen. Das bedeutet, dass die Pulsationsperiode P von TT Cnc nicht konstant ist, sondern im Zeitraum von

1916 bis Anfang 2007 mit einer weitgehend konstanten Rate zugenommen hat und dass sich die beobachteten Maximumzeiten im genannten Zeitraum mit einer quadratischen Ephemeridenformel *im Mittel* befriedigend berechnen lassen. H.-M. Steinbach [3] hat vor Kurzem Elemente für eine quadratische Ephemeridenformel angegeben. Diese Elemente wurden mit geringfügigen Änderungen bei der Untersuchung des Blazhko-Effektes von TT Cnc verwendet. Die Änderungen betreffen im Wesentlichen die Bezugsepoche E_0 , die so gewählt wurde, dass die Schwankungen der $(B-R)$ -Werte infolge des Blazhko-Effektes symmetrisch zur Nulllinie liegen. Die verwendeten Elemente lauten:

$$E_0[\text{HJD}] = 2454112,3975, \quad P[\text{d}] = 0,56345656, \quad Q[\text{d}] = 1,240\text{E-}10.$$

Aus Bild 2 geht weiterhin die beträchtliche Streuung (man beachte den Ordinatenmaßstab!) der Messpunkte um die Regressionsparabel hervor, die zum größten Teil vom Blazhko-Effekt herrührt.

Zur Ermittlung der Blazhko-Periode gibt es mehrere Verfahren. Für die hier anstehende Aufgabe wurde das PDM-Verfahren und die Fourieanalyse verwendet. Beim PDM-Verfahren (Abkürzung der englischen Bezeichnung Phase-Dispersion-Minimization) werden die mit der Periode P_B gefalteten, d.h. auf eine Periode reduzierten Daten, über der Phase in ein Faltungendiagramm (im Folgenden Blazhko-Diagramm genannt, da über der Blazhko-Phase Φ_B dargestellt) eingetragen und nach dem Periodenwert gesucht, bei dem die Streuung der Datenpunkte am kleinsten ist. Bei der gesuchten Periode ordnen sich nämlich die Datenpunkte entlang einer Kurve an [5, 6]. Die Suche nach der minimalen Streuung der Datenpunkte kann beim PDM-Verfahren durch systematisches Ändern des Periodenwertes manuell erfolgen, was den Vorteil hat, dass dann einzelne zeitlich isoliert stehende kleinere Gruppen von Datenpunkten individuell berücksichtigt werden können. Ansonsten ist heute die Verwendung von Computerprogrammen üblich, die insbesondere unerlässlich sind, wenn bei einer noch unbekanntem Periode in einem größeren Wertebereich gesucht werden muss. Für die durchgeführte Analyse der TT-Cnc-Daten wurde ein selbstgeschriebenes PDM-Programm verwendet.

Die Methode der Fourier-Methode arbeitet nach einem gänzlich anderen Verfahren. Die üblicherweise angewandte schnelle Fourier-Transformation (FFT) kann im vorliegenden Fall nicht benutzt werden, da die Beobachtungsdaten keine äquidistanten zeitlichen Abstände haben. Es müssen deshalb andere Algorithmen herangezogen werden. Geeignete Computerprogramme, die auch mit nichtäquidistanten Daten zurechtkommen sind z.B. Period98 und die neuere Version Period04 [4].

Die erwähnten Computerprogramme geben ein Periodogramm aus, in dem die in den Eingangsdaten enthaltenen Spektralanteile über der Periode P oder der Frequenz $f = 1/P$ meist in Form von „Linien“ aufgetragen sind. Diese „Linien“ sind aber nicht unendlich schmal, sondern haben eine endliche Breite, die proportional zum Kehrwert der zeitlichen Länge des Datensatzes ist. Alle diese Methoden und Programme zur Periodensuche haben Vor- und Nachteile und ihre Eigenarten, die beachtet werden müssen, wenn man sichere und genaue Ergebnisse erzielen will. Die erreichte Gesamtgenauigkeit des ermittelten Periodenwertes ist schwer abzuschätzen, da das Resultat

von vielen Einflüssen abhängt. Der abgeleitete Periodenwert ist im vorliegenden Fall u.a. abhängig von den ausgewählten Maximumzeiten, von der verwendeten Ephemeridenformel, von der zeitlichen Länge und der zeitlichen Besetzung des Datensatzes sowie vom benutzten Computerprogramm.

Einige allgemeinen Aussagen können aber gemacht werden. Für eine hohe Genauigkeit ist zunächst einmal die Konstanz der gesuchten Periode im Zeitintervall der Eingangsdaten unabdingbar. Weiterhin steigt die Genauigkeit mit zunehmender zeitlicher Länge L des Datensatzes. Bei den Maximumzeiten handelt es sich um Beobachtungsdaten, die mit Fehlern behaftet sind. Diese rufen ein Untergrundrauschen hervor, das sich störend bemerkbar macht. So kann ein einziger Ausreißer das Ergebnis bereits negativ beeinflussen. Aus diesem Grunde ist es wichtig, deutlich erkennbare Ausreißer vor der Periodenbestimmung zu eliminieren.

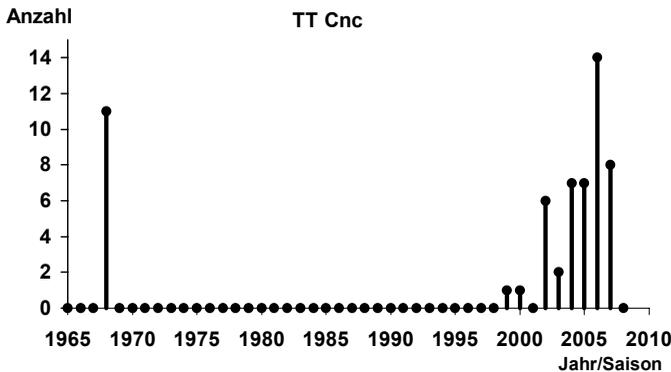


Bild 3. Histogramm der Anzahl der für die Ermittlung der Blazhko-Periode P_B verwendeten $(B-R)$ -Werte pro Jahressaison des Sterns TT Cnc. Die Jahressaison 2005 ist z.B. der Zeitraum von November 2004 bis April 2005.

Bei $(B-R)$ -Daten von Maximumzeiten eines Sterns mit mäßigem bis starkem Blazhko-Effekt tritt beim Wert der Blazhko-Periode P_B normalerweise die größte Spektrallinie im Periodogramm auf. Außer den Rauschsignalen erscheinen im Periodogramm aber noch eine Vielzahl anderer Spektralanteile, die die Hauptspektrallinie beeinflussen können. Ein Grund für diese zusätzlichen Spektrallinien sind u.a. die ungleiche Verteilung der Messwerte im gesamten Zeitintervall der Eingangsdaten. Um anschaulich zu demonstrieren, wie ungleich diese Verteilung bei den Daten von TT Cnc ist, zeigt das Bild 3 ein Histogramm, in dem die Anzahl der verwendeten $(B-R)$ -Werte pro Jahressaison angegeben ist. Abgesehen von der dreißigjährigen Lücke zwischen den photoelektrischen und den CCD-Beobachtungen, ist die Verteilung auch innerhalb der großen Gruppe der CCD-Daten, wie man sieht, sehr ungleichmäßig. Aber auch innerhalb einer Jahressaison sind sehr deutliche wiederkehrende Strukturen vorhanden. TT Cnc steht nachts nur in den Monaten November bis April hoch genug über dem Horizont, um photometrische Beobachtungen machen zu können. Das bedeutet, dass sich die Beobachtungen in einem Intervall von sechs Monaten konzentrieren und dann eine

Beobachtungslücke von (mindestens) einem halben Jahr auftritt. Diese Struktur wiederholt sich, soweit überhaupt Beobachtungen gemacht werden, Jahr für Jahr, also mit einer Periode $P_J = 365,25^d$. Insbesondere der Fourier-Algorithmus fasst diese Struktur als eine Amplitudenmodulation der Blazhko-Oszillationen auf, sodass auf beiden Seiten der Linie mit der Blazhko-Frequenz $f_B = 1/P_B$ Seitenlinien im Frequenzabstand $\Delta f = 1/P_J$ auftreten. Bei einer Blazhko-Periode von $89,1^d$ liegen diese Seitenlinien bei Perioden von rund 71^d und 119^d . Bei Verwendung des PDM-Verfahrens treten diese Seitenlinien erheblich schwächer in Erscheinung.

Die endliche zeitliche Länge L des untersuchten Datensatzes, von der, wie schon erwähnt, die erzielbare Genauigkeit abhängt, lässt sich auch als eine zeitliche Struktur der Daten auffassen. Diese ruft ein kammartiges Muster von Linien hervor, die dem ganzen Periodogramm überlagert sind und deren Abstand näherungsweise $\Delta P \approx P^2/L$ beträgt, vorausgesetzt es ist $L \gg P$. (Im vorliegenden Fall ist $P = P_B$ zu setzen.) Mit anderen Worten, eine Spektrallinie spaltet in eine ganze Serie von Trabanten auf. Für die Länge L muss in der angegebenen Beziehung ein effektiver Wert eingesetzt werden, der sich aus dem zeitlichen Abstand des Schwerpunktes der ersten und letzten etwa vier Messwerte des Datensatzes ergibt. Die auftretenden Feinstrukturlinien werden mit zunehmendem Abstand vom Hauptmaximum immer kleiner und schließlich vom Rauschen stark beeinträchtigt. Dieses Phänomen tritt vor allem dann in Erscheinung, wenn der Datensatz aus zwei isolierten Gruppen von Messwerten besteht, die einen großen zeitlichen Abstand haben, wie es bei TT Cnc gemäß Bild 3 der Fall ist.

Das Auftreten der eben beschriebenen Aufspaltung der Spektrallinien in eine kammartige Serie von Einzellinien lässt sich leicht anschaulich erklären. Bei der Periode $P = P_B$, bei der sich die Datenpunkte im Blazhko-Diagramm entlang einer Kurve anordnen und die Streuung minimal ist, tritt im Periodogramm die größte Feinstrukturlinie auf. Wenn man nun die Periode kontinuierlich ändert, wandern die Datenpunkte horizontal durch das Diagramm, da sich deren Blazhko-Phase ϕ_B ändert, ihre $(B-R)$ -Werte aber konstant bleiben. Die größten gegenseitigen Verschiebungen treten dabei bei den Punkten der beiden am Anfang und Ende stehenden isolierten Datengruppen auf. Wenn die Punkte beider Gruppen relativ gegeneinander gerade einmal durch das Diagramm gelaufen sind und $L \gg P_B$ gilt, dann ordnen sich die Punkte erneut in der Nähe einer Kurve an, und im Periodogramm erscheint bei der zugehörigen Periode $P_1 = P_B \pm \Delta P$ die erste Nachbarlinie zur Hauptlinie. Die Streuung der Punkte um die Kurve ist nun aber etwas größer als bei der Hauptlinie, weil sich die Punkte auch innerhalb der Gruppen etwas gegeneinander verschoben haben, sodass die Amplitude der Nachbarlinien kleiner als die der Hauptlinie ist. Bei weiterer Periodenänderung wiederholt sich dieser Vorgang auf beiden Seiten der Hauptlinie periodisch, sodass die Trabanten mit zunehmendem Abstand von der Hauptlinie schnell kleiner werden.

In der Praxis ist die Feinstruktur der Periodogramme, insbesondere bei der PDM-Methode, meist noch erheblich komplizierter. Um trotz der Störungen den gesuchten Periodenwert mit der größtmöglichen Sicherheit und Genauigkeit zu erhalten, sollte man nicht blind den Wert akzeptieren, den ein Computerprogramm liefert, sondern die nähere Umgebung des Hauptmaximums genauer studieren, indem man ein Periodogramm mit hoher Auflösung, d.h. mit einem hinreichend kleinen Perioden- bzw. Frequenzbereich, erstellt.

Als Beispiel zeigt Bild 4 das mit einem selbstgeschriebenen PDM-Computerprogramm erstellte Periodogramm der oben erwähnten 57 ($B-R$)-Werte von Maximumzeiten des Sterns TT Cnc. Die Spektrallinie mit der größten Amplitude hebt sich sehr deutlich vom Untergrund ab, was zeigt, dass die zur Spektrallinie gehörende Periode im untersuchten Signal, d.h. in den genannten ($B-R$)-Werten, stark vertreten sein muss. Diese Linie kann deshalb nur vom Blazhko-Effekt verursacht sein, was auch das mit dem entsprechenden Periodenwert erstellte, in Bild 5 angegebene und noch zu erörternde Blazhko-Diagramm bestätigt. Aus dem Periodogramm lässt sich also mehr oder weniger genau der Wert P_B der Blazhko-Periode entnehmen. Für eine erhöhte Genauigkeit muss die Feinstruktur berücksichtigt werden. Das Rauschen bleibt mit rund 10% der Maximalamplitude auf einem relativ niedrigen Pegel.

In Bild 4 ist auch die oben angesprochene Aufspaltung der Hauptlinie in eine Serie von Trabanten gut zu erkennen. Mit einer Blazhko-Periode $P_B = 89,10^d$ und einer effektiven Länge L des Datensatzes von ca. 14200^d ergibt sich mit der oben angegebenen Beziehung ein Abstand der Trabanten von $\Delta P \approx 0,56^d$, was mit den Abständen im Periodogramm gut übereinstimmt.

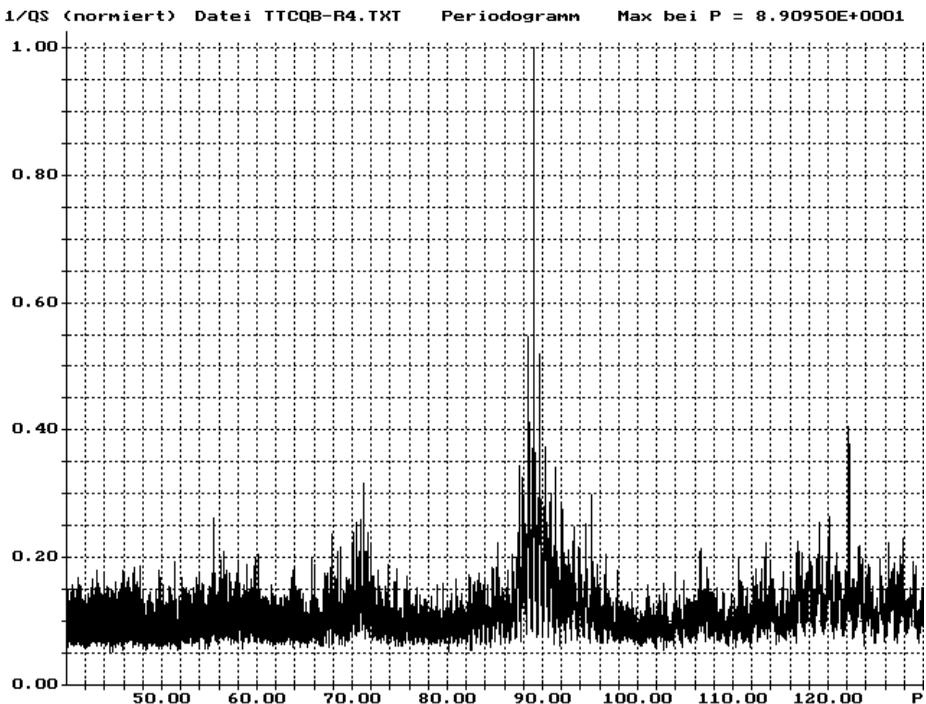


Bild 4. Periodogramm der 57 ($B-R$)-Werte des Datensatzes A von Maximumzeiten des RR-Lyrae-Sterns TT Cnc. Die Spektrallinie mit der größten Amplitude wird vom Blazhko-Effekt verursacht. Die Periodenwerte der Abszisse sind in Tagen angegeben. Weitere Einzelheiten siehe Text.

Zur Ermittlung der Blazhko-Periode P_B von TT Cnc wurde ein Datensatz mit ($B-R$)-Werten von Maximumzeiten dieses Sterns sorgfältig mit Periodogrammen, die mit dem genannten PDM-Computerprogramm erstellt wurden, untersucht. Dieser Datensatz, im Folgenden als Datensatz A bezeichnet, leitet sich aus 57 photoelektrischen und CCD-Beobachtungen von Maximumbeobachtungen im Zeitraum von 02.12.1967 bis 11.02.2007 ab und zur Berechnung der ($B-R$)-Werte wurde eine quadratische Ephemeridenformel verwendet, deren Elemente weiter oben angegeben sind. Es ergab sich folgender Wert der Blazhko-Periode

$$P_B = 89,10 \text{ [d]} \pm 0,02 \text{ [d]}.$$

Diese Angabe wurde unter der Annahme abgeleitet, dass sich P_B in der angegebenen Zeitspanne nicht verändert hat. Zur Prüfung dieser Voraussetzung wurden 46 ($B-R$)-Werte, die in den erheblich kürzeren Zeitbereich vom 28.03.1999 bis 11.02.2007 fallen, in der gleichen Weise untersucht. Es ergaben sich keine relevanten Abweichungen vom oben angegebenen Wert. Einschränkend muss allerdings gesagt werden, dass wegen des kürzeren Beobachtungszeitraumes auch die Toleranz des erhaltenen Ergebnisses größer ist und unter diesen Bedingungen etwa $\pm 0,15^d$ beträgt.

Schließlich wurde der Datensatz A auch noch mit dem Programm Period98 analysiert, das nach der Fourier-Methode arbeitet. Hier wurde eine Blazhko-Periode gefunden, die um $0,03^d$ über dem oben angegebenen Wert liegt. Im Blazhko-Diagramm beginnen jedoch bei diesem größeren Periodenwert die Punkte der frühen von Szeidl gemachten Beobachtungen bereits deutlich aus dem Bereich des mittleren Verlaufs der übrigen ($B-R$)-Werte herauszuwandern, sodass dieses Resultat weniger vertrauenswürdig ist als das Ergebnis der PDM-Methode.

Bei bekannter Blazhko-Periode lässt sich nun jeder Maximumzeit t_{\max} und damit auch jedem ($B-R$)-Wert eine Blazhko-Phase Φ_B zuordnen, die zur Erstellung eines Blazhko-Diagrammes benötigt wird. Für die Blazhko-Phase gilt

$$\Phi_B = \text{Frac}((t_{\max} - E_{B0})/P_B),$$

wobei Frac die Nachkommastellen des Argumentes dieser Funktion und E_{B0} eine beliebiger Bezugsepoche bedeuten. Diese wurde im vorliegenden Fall so gewählt, dass das Minimum der ($B-R$)-Werte bei der Blazhko-Phase 0 bzw. 1 liegt.

Bild 5 zeigt das Blazhko-Diagramm der ($B-R$)-Werte von Maximumzeiten des Sterns TT Cnc bei der ermittelten Blazhko-Periode $P_B = 89,10^d$. Es sind die 57 Punkte des Datensatzes A dargestellt, die auch zur Ableitung von P_B verwendet wurden. Zusätzlich als offene Quadrate sind die letzten sechs CCD-Beobachtungen eingetragen, die deutlich unter den mittleren Werten der übrigen Messpunkte liegen. Weiterhin wurde der geschätzte mittlere Verlauf der ($B-R$)-Werte als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Aus diesem Diagramm lassen sich einige wichtige und interessante Resultate ablesen. Außer den letzten sechs CCD-Beobachtungen liegen alle übrigen Punkte, und zwar auch die Messpunkte von Szeidl (offene Dreiecke), in der Nähe des mittleren Verlaufes, wobei bis auf wenige Ausnahmen die Abweichungen kleiner als $\pm 5^m$ sind. Die

Amplitude der ($B-R$)-Schwankungen beträgt ziemlich genau $\pm 20^m$. Der mittlere Verlauf der ($B-R$)-Werte lässt sich, wie in Bild 5 durch gestrichelte Linien angedeutet ist, gut durch Geraden approximieren, wobei im Abstieg ein Knick aufzutreten scheint. Die Länge des Anstiegs beträgt etwa 62%, die der ersten Abstiegsphase etwa 27,5% und diejenige der zweiten Abstiegsphase 10,5% von P_B . Ob der mittlere An- und Abstieg wirklich genau linear verläuft und ob an den Übergängen von An- und Abstieg Knicke auftreten, lässt sich bei der relativ großen Streuung und der relativ geringen Anzahl von Messwerte nicht mit Sicherheit entscheiden. Sicher ist aber, dass die ($B-R$)-Werte im Blazhko-Diagramm keinen wellenartigen etwa sinusförmigen Verlauf haben. Geht man von einer linearen Abhängigkeit aus, so folgt daraus ein periodischer Wechsel zwischen mehreren Pulsationsperioden. Ähnlich wie bei einem elektronischen Flipflop gibt es mehrere stabile Zustände, zwischen denen bei Erreichen bestimmter Grenzwerte eine Umschaltung erfolgt. Die physikalischen Bedingungen sind selbstverständlich in den Sternen völlig andere als bei einem Flipflop. Die mittlere Pulsationsperiode P verändert sich bei TT Cnc in der Nähe der Epoche E_0 im Anstieg der ($B-R$)-Werte um etwa $\Delta P_{an}[d] = +2,835E-4$, im ersten Abstieg um etwa $\Delta P_{ab1}[d] = -2,364E-4$ und im zweiten Abstieg um etwa $\Delta P_{ab2}[d] = -10,56E-4$. Das sind Änderungen bis zu 0,1%.

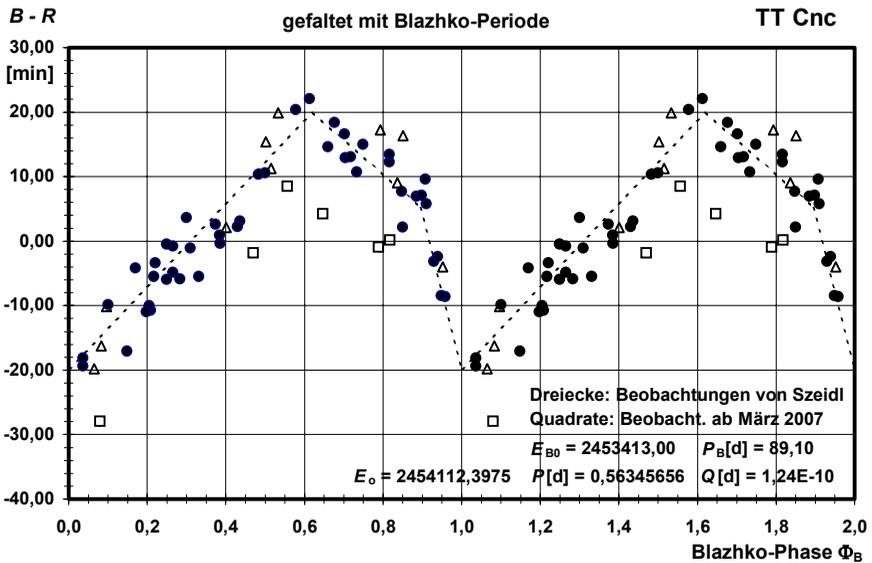


Bild 5. Blazhko-Diagramm von ($B-R$)-Werten der Maximumzeiten des Sterns TT Cnc bei einer Blazhko-Periode $P_B = 89,10^d$. Zur besseren Übersicht erstreckt sich der dargestellte Phasenbereich von 0 bis 2. Weitere Einzelheiten siehe Text.

Mit Hilfe des Blazhko-Diagramms von Bild 5 ist es möglich, den Blazhko-Effekt bei den berechneten Maximumzeiten von TT Cnc zu berücksichtigen. Das geschieht dadurch, dass man die zur Beobachtungszeit gehörende Blazhko-Phase Φ_B ermittelt und dann den bei dieser Phase im Diagramm angegebenen Wert der gestrichelten Geraden zur berechneten Maximumzeit addiert. Um die Wirkung dieser Blazhko-Korrektur deutlich zu machen, ist in Bild 6 ein ($B-R$)-Diagramm ohne und in Bild 7 ein solches mit

Blazhko-Korrektur angegeben. Wie in Bild 5 sind auch hier die 57 Messpunkte des Datensatzes A eingetragen, die zur Ableitung der Blazhko-Periode P_B benutzt wurden, sowie die sechs letzten CCD-Beobachtungen.

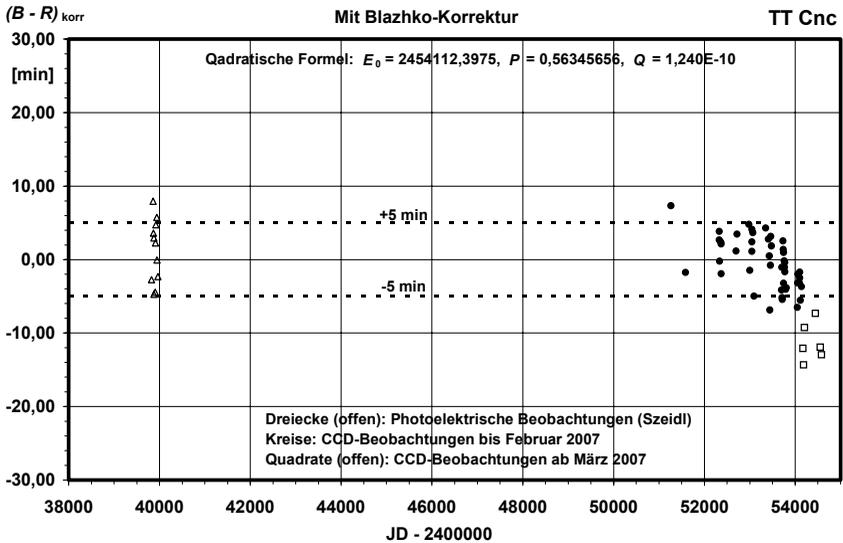
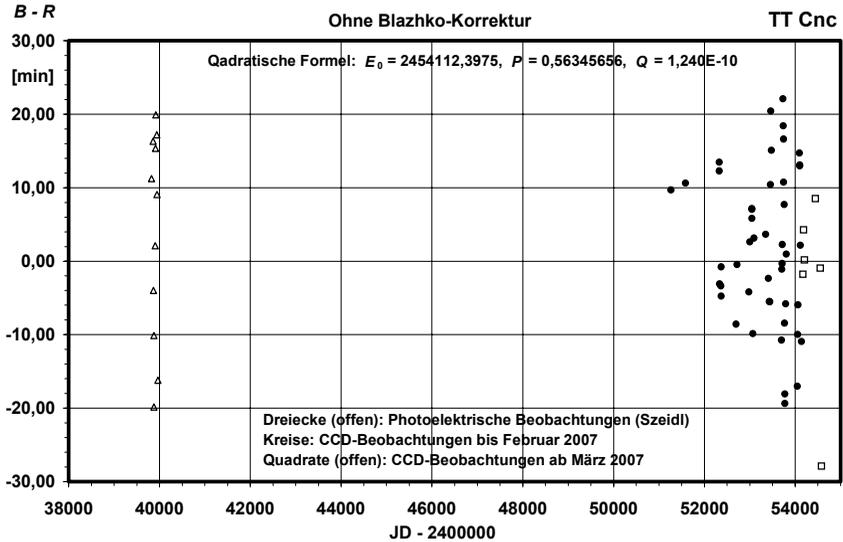


Bild 6 und Bild 7. $(B-R)$ -Diagramm der Maximumzeiten von TT Cnc ohne Blazhko-Korrektur (oben) und mit Blazhko-Korrektur (unten).

In dem Diagramm ohne Blazhko-Korrektur beträgt die in erster Linie durch den Blazhko-Effekt verursachte Streuung der ($B-R$)-Werte $\pm 20^m$, während sie im Diagramm mit dieser Korrektur auf $\pm 5^m$, also auf $\frac{1}{4}$, geschrumpft ist. Nur wenige Punkte, darunter die sechs letzten CCD-Messwerte, liegen außerhalb dieses Toleranzbereiches. Die übrigbleibende Reststreuung rührt im Wesentlichen von Messfehlern her, die, wie weiter oben erläutert, auch bei CCD-Beobachtungen einige Minuten betragen können. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass auch noch andere Effekte einen Beitrag zur Reststreuung liefern. Dieser Anteil liegt aber höchstens in der gleichen Größenordnung wie die Streuung durch die Messwerte. Mit der gegenwärtigen Datenbasis dürfte es kaum möglich sein, die zusätzlichen Effekte zu identifizieren und genauer zu untersuchen.

Es muss noch einmal kurz auf die sechs letzten CCD-Beobachtungen eingegangen werden. Im Diagramm des Bildes 6 sieht es so aus, als wenn sich unter diesen Messwerten nur ein einziger Ausreißer befindet. Die restlichen fünf Werte liegen sogar in der Nähe der Nulllinie. Erst die Blazhko-Korrektur deckt auf, dass, wie Bild 7 zeigt, alle sechs Punkte deutlich unterhalb des Toleranzbandes von $\pm 5^m$ liegen und der Ausreißer des vorigen Bildes nun nicht mehr die größte Abweichung von der Nulllinie hat. Dieses Beispiel zeigt, dass es zur Aufdeckung von unbekanntem Effekten durchaus nützlich sein kann, die Blazhko-Korrektur durchzuführen oder wenigstens das Blazhko-Diagramm genau zu studieren.

Tabelle 1: Einige charakteristische Eigenschaften von TT Cnc und UX Tri im Vergleich

Eigenschaft	TT Cnc	UX Tri
Scheinbare Helligkeit	10,72...11.78 [mag]	12,7..13,9[mag]
Pulsationsperiode P	0,56345656 [d] (zur Epoche E_0)	0,46691 [d] (veränderlich)
Blazhko-Periode P_B	89,10 [d]	43,7 [d]
Hub der Maximumhelligkeit (CCD-Beob.)	0,35 [mag]	0,38 [mag]
Amplitude der ($B-R$)-Werte der Maximumzeiten	± 20 [min]	± 45 [min]
Reststreuung im ($B-R$)-Diagramm der korrigierten Maximumzeiten	± 5 [min]	± 13 [min]
Länge der Anstiegsflanke im Blazhko- Diagramm der Maximumzeiten	0,620 P_B	0,08 P_B
Länge der Abstiegsflanke im Blazhko- Diagramm der Maximumzeiten	0,275 P_B und 0,105 P_B	0,92 P_B

UX Trianguli ist ein RR-Lyrae-Stern mit einem starken Blazhko-Effekt [5, 6, 7]. Dieser Stern hat qualitativ ähnliche Eigenschaften wie TT Cnc, quantitativ gibt es allerdings deutliche Unterschiede. Es dürfte aufschlussreich sein, die Eigenschaften beider Sterne miteinander zu vergleichen. In der Tabelle 1 sind einige charakteristische Daten dieser Blazhko-Sterne gegenübergestellt. Bei beiden Sternen handelt es sich um klassische Blazhko-Sterne vom Typ RRab, also nicht um Doppelmoden-Sterne vom Typ RRc, bei denen veränderliche Lichtkurven durch zwei gleichzeitig auftretende Pulsationsschwingungen auftreten, deren Perioden in einem irrationalen Verhältnis zueinander stehen. UX Tri hat eine um rund zwei mag geringere scheinbare Helligkeit und ist

deshalb, besonders mit kleineren Teleskopen, schwieriger zu beobachten, was sich auch auf die gemessenen und angegebenen Helligkeitswerte negativ auswirkt. Die Pulsationsperioden P beider Sterne fallen in den Hauptbereich der RRab-Sterne. Bei TT Cnc ist die Periode P im Beobachtungszeitraum von 1916 bis 2006 konstant um $2Q \approx 2,5E-10$ [d] pro Pulsationszyklus angestiegen, sodass sich die Maximumzeiten in diesem Intervall mit einer quadratischen Ephemeridenformel darstellen lassen. In der Tabelle ist die Periode P bei der Epoche E_0 angegeben. Bei UX Tri sind schon mehrfach Periodenänderungen aufgetreten, sodass in diesem Fall nur ein mittlerer Wert für P in der Tabelle aufgeführt ist. Die Blazhko-Perioden P_B stehen etwa im Verhältnis 2:1, wobei UX Tri in den Hauptbereich der Blazhko-Periodenlänge fällt, während TT Cnc schon zu den langperiodischen Blazhko-Sternen gerechnet werden muss. Gesicherte Änderungen der Blazhko-Periode konnten bisher weder bei TT Cnc noch bei UX Tri nachgewiesen werden.

Sowohl der Gesamthub der Helligkeit als auch die Veränderungen der Maximumhelligkeit unterscheiden sich bei beiden Sternen nur wenig. Dagegen ist die Amplitude der durch den Blazhko-Effekt verursachten ($B-R$)-Werteänderungen der Maximumzeiten bei UX Tri mehr als doppelt so groß als bei TT Cnc. Die mittleren An- und Abstiege der ($B-R$)-Werte der Maximumzeiten im Blazhko-Diagramm haben nicht nur bei TT Cnc, sondern auch bei UX Tri näherungsweise einen linearen Verlauf. Sehr unterschiedlich sind aber die Phasenbereiche der Anstiegs- und Abstiegsflanken bei beiden Sternen. Bei UX Tri ist die Anstiegsflanke mit nur ca. 8% der Blazhko-Periode sehr kurz und demgemäß steil und die leicht gekrümmte Abstiegsflanke entsprechend lang und flach abfallend. Dagegen ist bei TT Cnc die Anstiegsflanke mit 62% von P_B vergleichsweise lang und insbesondere der zweite Teil der Abstiegsflanke mit ca. 10,5% von P_B kurz und steil. Eine gemeinsame Eigenschaft beider Sterne ist jedoch, dass im Blazhko-Diagramm die Verläufe der mittleren ($B-R$)-Werte an den Übergängen der An- und Abstiege, soweit beobachtbar, abrupt ablaufen.

Abschließend kann gesagt werden, dass es wünschenswert wäre, die Blazhko-Periode von TT Cnc auch noch unabhängig von der hier durchgeführten Untersuchung durch eine Analyse der Variationen der Maximumhelligkeiten dieses Sterns zu ermitteln.

Literatur:

- [1] B. Szeidl, The Secondary Period of RRab Star TT Cancri, IBVS 278
- [2] GEOS RR Lyrae database (<http://dbrr.ast.obs-mip.fr/>)
- [3] H.-M. Steinbach, Einführung quadratische Lichtwechselelemente, BAV Rbf. 57(2008) S.16
- [4] Lenz, P., Breger, M., 'Period04' Version 1, 2005, Comm. in Astroseismology, 146, 53, (<http://www.univie.ac.at/tops/Period04>)
- [5] Achterberg, H., Husar, D., The RRab Star UX Tri: Discovery of a Blazhko Effect with Changing Period, 2001, IBVS 5210
- [6] Achterberg, H., UX Trianguli, RR-Lyrae-Sterne und der Blazhko-Effekt, BAV Mitteilungen 145 (2002)
- [7] Achterberg, H., Husar, D., UX Tri: Period Change Discovered and Unchanged Strong Blazhko Effect Confirmed, OEJV 0041 (2006), (<http://var.astro.cz/>)