

Aus der Reihe

Astronomie

Astronomical Bulletin Wischnewski

No. 20: Blazhko-Effekt beim RR-Lyrae-Stern AR Her

Lichtwechselelemente und Blazhko-Effekt beim RR-Lyrae-Stern AR Herculis

Abstract AR Herculis ist ein RR-Lyrae-Stern vom Typ RRAB und weist ein A7- bis F3-Spektrum auf. Seine visuelle Helligkeit (V) schwankt im Mittel zwischen 10.59 mag und 11.63 mag. Aus über 34000 Helligkeitsmessungen von 31 Beobachtern der AAVSO International Database und zusätzlichen Daten der BAV konnten Zeiten und Helligkeiten von 116 Maxima zwischen 2003 und 2015 bestimmt werden. Aus der (B-R)-Analyse ergibt sich für den Zeitraum von 2009 bis 2015 ein neuer Wert für die Periode von $0.46999746(\pm 145)$ Tagen. Die Analyse der Maximumszeitpunkte zeigt ferner einen deutlichen Blazhko-Effekt mit einer Blazhko-Periode von $32.062(\pm 13)$ Tagen. Die Maximumshelligkeit V_{\max} nimmt von 2009 bis 2015 um 22 mmag/Jahr ab und zeigt ebenfalls einen Blazhko-Effekt mit einer Periode von $29.528(\pm 17)$ Tagen. Diese Arbeit untersucht ferner den Prozess des häufig benutzten (B-R) vs. V_{\max} Diagramms mit Hilfe von Simulationen auf Basis angenommener und beobachteter Daten.

Inhalt	1 Einführung	2
	2 Beobachtungen	2–3
	3 Ergebnisse und Diskussion	4–7
	4 Schlussfolgerungen	7
	Danksagung	8
	Referenzen	8
	Anhang	9

Eine ausführliche Behandlung des Themas Veränderliche Sterne finden Sie im Buch
›Astronomie in Theorie und Praxis‹, 7. Auflage (ISBN 978-3-00-052984-9).

Dr. Erik Wischnewski

Heinrich-Heine-Weg 13 • D-24568 Kaltenkirchen

E-Mail: proab@t-online.de • Internet: <http://www.astronomie-buch.de>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Rechte vorbehalten.

© Dr. Erik Wischnewski, Kaltenkirchen 2016

Version: 10.06.2016 07:35:41

1 Einführung

AR Herculis ist ein RR-Lyrae-Stern vom Typ RRAB und weist ein A7- bis F3-Spektrum auf. Seine visuelle Helligkeit (V) schwankt zwischen 10.59 mag und 11.63 mag. Der Anstieg ($m-M$) beträgt 20% der Periode [Kholopov, 1988].

AR Herculis zeigt deutlich einen Blazhko-Effekt. Sowohl die Minimums- als auch die Maximumshelligkeit (V_{\max}) schwanken erheblich, ebenso der Zeitpunkt des Maximums (B-R).

Periode | Klepikova [1957] gibt für den Zeitraum 1905 bis 1954 eine Periode von 0.4700234 Tagen an ($E_0 = \text{HJD } 2424794.274$). Für den Zeitraum von 1954 bis 1967 nennt Lange [1969] eine Periode von 0.469975 Tage ($E_0 = \text{HJD } 2439692.683$). Kholopov nennt im GCVS [1988] wiederum mit 0.470028 Tagen eine etwas längere Periode ($E_0 = \text{HJD } 2441454.347$). Diese Lichtwechselelemente werden auch im VSX der AAVSO als aktuelle Werte zitiert (Gleichung 1). Feast et al [2008] geben als Periode den Wert 0.469981 Tagen an, während Hübscher [2016a] die Periode 0.46998756 Tage ($E_0 = \text{HJD } 2454683.4366$) nennt (Gleichung 2).

$$(1) R = \text{HJD } 2441454.347 + 0.470028 \cdot E$$

$$(2) R = \text{HJD } 2454683.4366 + 0.46998756 \cdot E$$

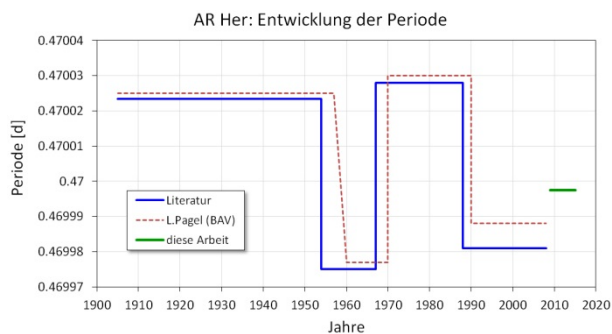


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Periode gemäß den im Text genannten Angaben der Literatur, ergänzt um die Werte von L. Pagel [2008] und dem Ergebnis aus dieser Arbeit.

Blazhko-Effekt | Nach Balázs und Detre [1939] schwankt von 1935 bis 1939 die photographische Maximumshelligkeit um 0.53 mag (10.28–10.81 mag), die Minimumshelligkeit um 0.34 mag (11.71–12.05 mag) und die Amplitude schwankt zwischen 0.90 mag und 1.77 mag. Balázs und Detre schätzen die Blazhko-Periode auf 31.49 Tage.

Almar [1961] kommt zu dem Schluss, dass die Periodenänderungen sehr unregelmäßig und daher schwer zu interpretieren sind. Almar leitet eine geringfügig größere Blazhko-Periode von 31.5489 Tage ab.

Einen noch größeren, aber gerundeten Wert geben Wils et al [2006] mit 32 Tage an.

2 Beobachtungen

Daten | Es wurden 34102 Helligkeitsmessungen von 31 Beobachtern zwischen HJD 2438506 und HJD 2457277 der AAVSO International Database ausgewertet. Verwendet wurden nur Helligkeit, deren Farbbereich mit V und TG (tricolor green = Grünkanal eines Dreifarbensensors) klassifiziert waren. Es wurden alle Zeitintervalle herausgesucht, die geeignet waren, den Zeitpunkt und die Helligkeit eines Maximums zu bestimmen.

Bestimmung der Maxima | Um aus den Einzelmessungen der AAVSO-Datenbank Maxima zu bestimmen, wurden genügend kurze Zeitabschnitte gewählt, sodass eine Regression mit einem Polynom 2. bis 6. Grades (in 70% aller Fälle 3. Grades) möglich war. Alle Graphen wurden visuell überprüft und in zwei Fällen musste das berechnete Maximum daraufhin geringfügig korrigiert werden (diese Messreihen hatten ein sehr spitzes Maximum). Sofern Maximumszeiten der Beobachter vorlagen, wurden diese zum Vergleich herangezogen. Sie bestätigten die Werte dieser Arbeit. Die Ergebnisse sind in Anhang 1 aufgeführt.

Untersuchte Zeitspanne | Die so erhaltenen Maxima liegen im Zeitintervall HJD 2452745 bis 2457245 (14. 04. 2003 – 10. 08. 2015). Die Maxima vor HJD 2454880 (17. 02. 2009) folgen noch dem (B-R)-Verhalten, das seit etwa 1990 vorliegt [Pagel, 2008]. In dieser Arbeit wird das Periodenverhalten von 2009–2015 untersucht, bei dem sich wieder eine längere Periode etabliert.

Somit konnten 103 Maxima von insgesamt 14 Beobachtern aus den AAVSO-Daten berechnet werden:

Arranz Lázaro, Alejandra (AALB)	1
Arranz, Teofilo (ATE)	27
Bialozynski, Jerry (BIZ)	1
Boardman, James (BJAA)	1
Banfi, Massimo (BVN)	4
Dvorak, Shawn (DKS)	8
Hamsch, Franz-Josef (HMB)	2
Menzies, Kenneth (MZK)	3
Papini, Riccardo (PCC)	5
Pagel, Lienhard (PLN)	18
Poklar, Rudy (PRX)	2
Petrew, Vance (PVA)	1
Samolyk, Gerard (SAH)	22
Sabo, Richard (SRIC)	8

Ferner wurden weitere 13 Maxima von L. Pagel ergänzt, die den BAV-Mitteilungen [Hübscher, 2016b] entnommen werden konnten und noch nicht in der AAVSO-Datenbank enthalten gewesen sind.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Lichtwechselemente

Bei Verwendung der Lichtwechselemente aus dem GCVS bzw. VSX der AAVSO nach Gleichung (1) erhält man ein (B-R)-Diagramm, das einen Epochensprung enthält. Das bedeutet, dass die Periode zu lang ist und sich die Abweichungen in (B-R) innerhalb der untersuchten Zeitspanne bereits zu einer vollständigen Periode aufaddiert haben.

Zur Vermeidung solcher Epochensprünge wurden deshalb die Lichtwechselemente der BAV aus Gleichung (2) verwendet:

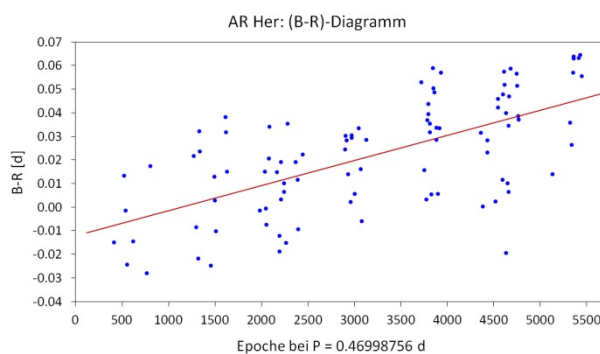


Abbildung 2: (B-R)-Verlauf als Funktion der Epoche nach Gleichung (2).

Mit der gewichteten Ausgleichsgeraden

$$(3) \quad B-R = -0.0115^d + 9.90 \cdot 10^{-6} \cdot E$$

aus Abbildung 2 ergeben sich die verbesserten Lichtwechselemente

$$(4) \quad R = \text{HJD } 2454683.4251 + 0.46999746 \cdot E \\ \pm 0.0058 \pm 0.00000145$$

Der angegebene Periodenfehler basiert auf einer gewichteten linearen Regression, bei der die Streuung durch den Blazhko-Effekt als Messfehler betrachtet wird. Ich schätze die tatsächliche Ungenauigkeit der Periode aufgrund der noch folgenden Berechnungen zum Blazhko-Effekt etwa auf die Hälfte.

3.2 Schwankung der Maximumszeit

Mit Gleichung (4) ergibt sich für B-R der zeitliche Verlauf wie in Abbildung 3 dargestellt, welches zur Analyse eines Blazhko-Effekts herangezogen wird, wobei ein Teil der Streuung auch durch Messfehler verursacht wird.

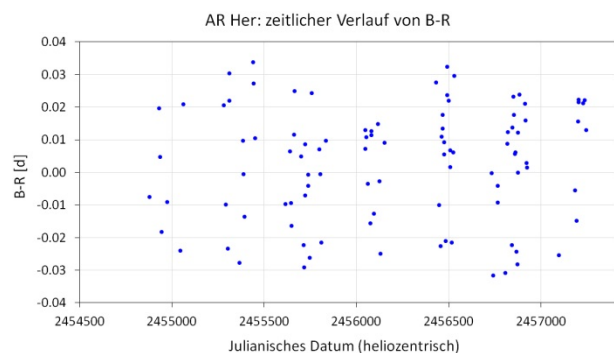


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf von B-R nach Gleichung (4) im Zeitraum von Februar 2009 bis August 2015.

Die Streuung von B-R liegt zwischen -0.0317 und 0.0336 Tagen. In Einheiten der Periode ausgedrückt ist das -6.74% bis 7.15% , um die der Maximumszeitpunkt aufgrund des Blazhko-Effekts schwankt.

3.3 Schwankung der Maximumshelligkeit

Abbildung 4 stellt den zeitlichen Verlauf der visuellen Maximumshelligkeiten V_{\max} dar.

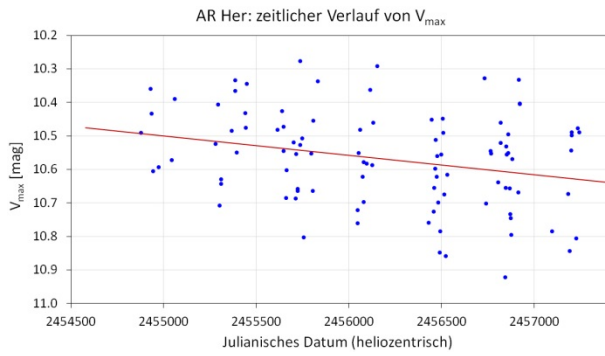


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Maximumshelligkeiten V_{\max} im Zeitraum von Februar 2009 bis August 2015.

Die mittlere Maximumshelligkeit V_{\max} im Zeitraum von 2009 bis 2015 beträgt 10.569 mag. Sie streut im Bereich von 10.28–10.92 mag und somit um insgesamt 0.64 mag.

Die photographischen Maximumshelligkeit aus den Jahren 1935–1939 [Balázs, 1939] liegen unter Berücksichtigung von $m_{pg} \approx B$ und eines mittleren (B–V)-Indexes von 0.17 mag [Weigert, 2005] bei $V_{\max} \approx 10.1–10.6$ mag. Die jetzt ermittelten Werte liegen deutlich darunter (dunkler). Im Vergleich zur mittleren Maximumshelligkeit von 10.59 mag, die Kholopov [1988] angibt, liegt der Wert dieser Arbeit etwas darüber (heller).

Die langfristigen Änderungen der Maximumshelligkeit sind bereits innerhalb des Zeitabschnittes 2009–2015 erkennbar. In diesen 6.5 Jahren nimmt die Maximumshelligkeit kontinuierlich um 22 mmag/Jahr ab.

3.4 Blazhko-Effekt der Maximumszeit

Zur Ermittlung der Blazhko-Periode werden die Messungen aus Abbildung 3 einer Fourieranalyse und einer anschließenden Periodenverbesserung unterzogen. Dazu wurde das Programm Period04 [Lenz, 2005] verwendet. Der beste Fit ergibt sich für eine Blazhko-Periode von $P_B = 32.062 \pm 0.013$ Tagen und der folgenden Gleichung:

$$(5) \quad B-R = -0.0017(\pm 16) + 0.0241(\pm 13) \cdot \sin(2\pi \cdot (0.03118961(\pm 122) \cdot t + 0.923(\pm 8)))$$

wobei die Zeitangabe t als HJD erfolgt und die Fehler der Koeffizienten in Klammern angegeben sind, bezogen auf die letzten angegebenen Ziffern.

Aus den Gleichungen (4) und (5) folgen die verbesserten Lichtwechselelemente unter Einbeziehung der Blazhko-Periode:

$$(6) \quad R = \text{HJD } 2457245.3829 + 0.46999746 \cdot E + 0.0241 \cdot \sin(0.092105456 \cdot E + 2.8519)$$

Abbildung 5 zeigt die verbleibende Restabweichung in B–R. Eine weitere Analyse bringt keine signifikante Verbesserung.

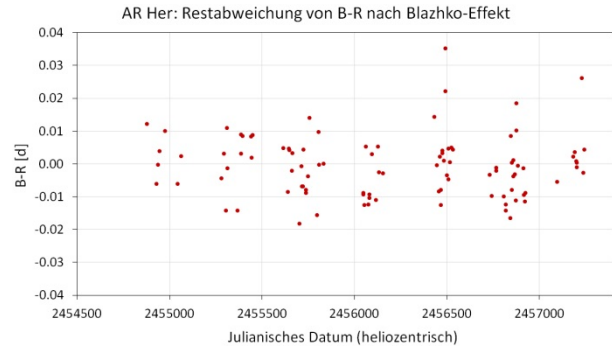


Abbildung 5: Restabweichung von B–R bei Anwendung von Gleichung (5).

Die quadratische Abweichung der Wertemengen aus den Abbildungen 3 und 5 spiegelt die Qualität und Relevanz der Blazhko-Periode aus B–R wider.

ohne Blazhko-Effekt:	0.0174 d (Abb. 3)
mit Blazhko-Effekt:	0.0093 d (Abb. 5)

Phasendiagramm | Mit der Blazhko-Periode von 32.062 Tagen ergibt sich ein Phasendiagramm (Abbildung 6), das den Charakter des Blazhko-Effekts deutlich visualisiert. Die Blazhko-Kurve ist unsymmetrisch und wird durch die eingezeichnete sinusförmige Kurve nur annähernd repräsentiert.

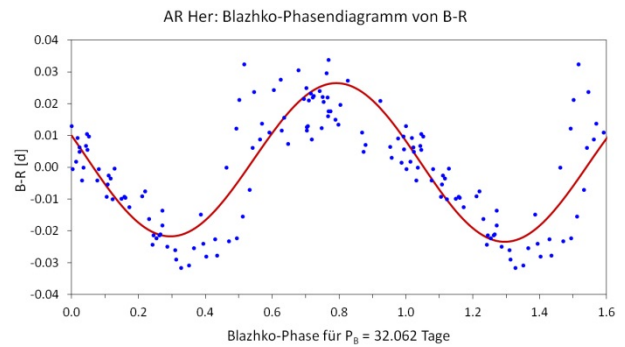


Abbildung 6: Blazhko-Phasendiagramm von B–R bei einer Blazhko-Periode von 32.062 Tagen.

Kontrolle | Mit Hilfe eines eigenen Periodensuchprogramms, das die Periode mit der geringsten quadratischen Abweichung zu einem Polynom sucht, wurde eine Blazhko-Periode von 32.054 ± 0.001 Tage für B–R ermittelt, in annähernder Übereinstimmung zu dem obigen Wert.

3.5 Blazhko-Effekt der Maximumshelligkeit

In gleicher Weise wie für B–R wurde auch für die visuelle Maximumshelligkeit V_{\max} die Blazhko-Periode mit Hilfe des Programms Period04 bestimmt. Dazu wurden die Differenzen der Maximumshelligkeit ΔV_{\max} zwischen der gemessenen Maximumshelligkeit V_{\max} und der Ausgleichsgeraden, wie in Abbildung 4 eingezeichnet, herangezogen (Abbildung 7).

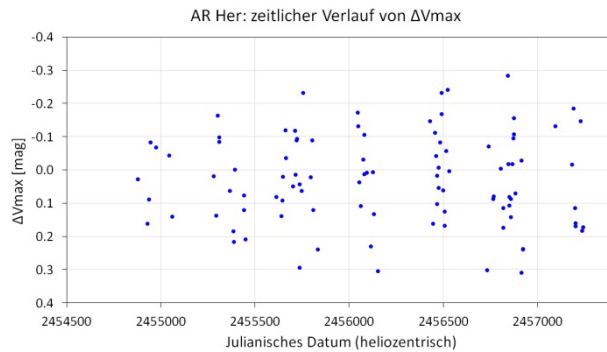


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Differenz der Maximumshelligkeit ΔV_{\max} zwischen der gemessenen Maximumshelligkeit V_{\max} und der Ausgleichsgeraden aus Abbildung 4.

Basierend auf den Werten in Abbildung 7 ergibt sich als bester Fit eine Blazhko-Periode von 29.528 ± 0.017 Tagen. Die Restabweichung ist in Abbildung 8 wiedergegeben.

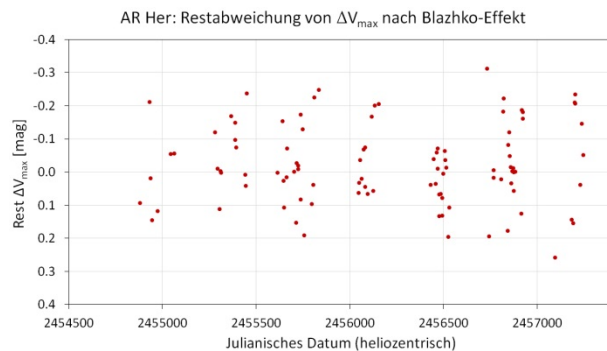


Abbildung 8: Restabweichung von V_{\max} bei Anwendung der Blazhko-Periode von 29.528 Tagen..

Auch hier bringt die weitere Analyse der Restabweichung keine signifikante Verbesserung.

Die quadratische Abweichung der Wertemengen aus den Abbildungen 7 und 8 spiegelt die Qualität und Relevanz der Blazhko-Periode aus V_{\max} wider.

ohne Blazhko-Effekt:	0.135 mag	(Abb. 7)
mit Blazhko-Effekt:	0.120 mag	(Abb. 8)

Phasendiagramm | Mit der Blazhko-Periode von 29.528 Tagen ergibt sich ein Phasendiagramm (Abbildung 9), das den Charakter des Blazhko-Effektes wie schon beim Phasendiagramm für B–R auch bei V_{\max} widerspiegelt. Im Gegensatz zu B–R ist hier die Blazhko-Kurve symmetrisch. Auch deshalb dürfte die zweite Blazhko-Periode bei der Maximumshelligkeit nicht signifikant und relevant erscheinen.

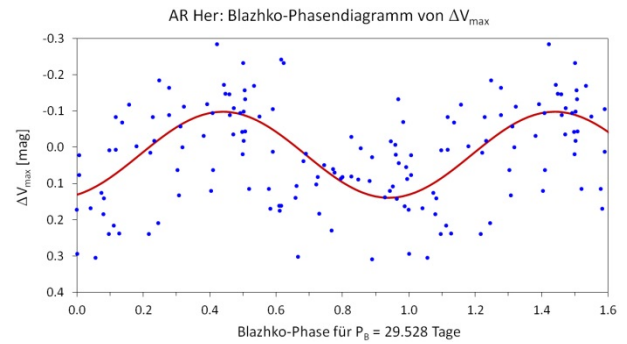


Abbildung 9: Blazhko-Phasendiagramm von V_{\max} bei einer Blazhko-Periode von 29.528 Tagen.

Kontrolle | Mit Hilfe eines eigenen Periodensuchprogramms, das die Periode mit der geringsten quadratischen Abweichung zu einem Polynom sucht, wurde eine Blazhko-Periode von 29.53 ± 0.01 Tage für V_{\max} ermittelt, in guter Übereinstimmung zu dem obigen Wert.

3.6 Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramm

Poretti et al. [2016] zeigen, dass RR-Lyrae-Sterne häufig ein korreliertes Verhalten zwischen B–R und V_{\max} aufweisen. Trägt man V_{\max} über B–R in einem Diagramm auf, ergeben sich bei zahlreichen RR-Lyrae-Sternen Ellipsen, oft auch als ›Blazhko-Kartoffel‹ bezeichnet. Bestimmte Maximumshelligkeiten treten bei verschiedenen Maximumzeiten B–R auf und umgekehrt. Dabei umlaufen die Werte zeitlich geordnet die Ellipse, sowohl im Uhrzeigersinn als auch gegen den Uhrzeigersinn [Le Borgne, 2012].

Simulation | Für ein besseres Verständnis der Vorgänge in einem solchen Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramm wurden einige Simulationen durchgeführt: Sind die beiden Blazhko-Perioden (für B–R und V_{\max}) gleich groß, so ergeben die Maxima eine geschlossene Ellipse (Abb. 10 links). Die Ausrichtung der Apsidenlinie ist abhängig von den Phasen der beiden Blazhko-Schwingungen.

Simulation von Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagrammen

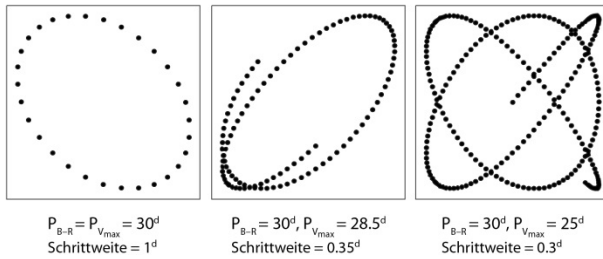


Abbildung 10: Simulationen des Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramms (›Blazhko-Kartoffel‹) für verschiedene Blazhko-Perioden. Die Schrittweite hat nur Auswirkungen auf die Punktdichte.

Sobald sich beide Perioden unterscheiden, sind die ›Ellipsen‹ nicht mehr geschlossen, sondern offen (Abb. 10 mittig). Außerdem rotiert die Apsidenlinie. Besonders bei größeren Periodendifferenzen (Abb. 10 rechts) wird deutlich, dass die Kurve keine geschlossene Ellipse mehr ergibt und dass die Apsidenlinien stark rotiert. Deutlich wird auch, dass sich die Exzentrizität der ›Ellipse‹ ändert. Dabei schwingt sie mit einer Periode, die ich hier als Blazhko-Superperiode P_{Super} bezeichne:

$$(7) \quad P_{\text{Super}} = \frac{P_{\text{B-R}} \cdot P_{V_{\max}}}{|P_{\text{B-R}} - P_{V_{\max}}|}$$

Innerhalb einer Blazhko-Superperiode wechselt der Drehsinn zweimal. Die Arbeit von Poretti et al. zeigt, dass es sowohl RR-Lyrae-Sterne gibt, deren Maxima im Uhrzeigersinn, als auch solche, deren Maxima gegen den Uhrzeigerinn wandern. Die Umkehr des Drehsinns findet genau dann statt, wenn die ›Ellipse‹ zur Geraden wird.

Die Beispiele in Abbildung 10 sind symbolisch, jedoch mit Werten gerechnet, die eng bei den realen Werten für RR-Lyrae-Sterne liegen.

In Abbildung 11 werden einige Zustandsdiagramme gezeigt, die mit den Perioden von AR Herculis, wie sie in dieser Arbeit ermittelt wurden, gerechnet wurden ($P_{\text{B-R}} = 32.062$ Tage, $P_{V_{\max}} = 29.528$ Tage). Zudem wurde eine Streuung hinzugefügt, die von der Größenordnung her den mittleren Fehlern der Messungen in B–R (± 0.0039 Tage $\approx 13\%$) und V_{\max} (± 0.0047 mag $\approx 3\%$) entsprechen.

Simulation des Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramms von AR Her



Abbildung 11: Simulation des Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramms von AR Herculis für die Perioden 32.062 Tage und 29.528 Tage. Verwendet wurde eine Streuung entsprechend der mittleren Fehler von B–R (0.0039 Tage) und V_{\max} (0.0047 mag). Das linke Bild zeigt jedes Maximum in einem Zeitraum von 100 Tagen. Das mittlere Bild zeigt jedes fünfte Maximum im selben Zeitraum. Das rechte Bild zeigt ebenfalls jedes fünfte Maximum in einem anderen 100-Tage-Intervall.

Wegen der Drehung der Apsidenlinie und der Änderung der Exzentrizität bleibt eine ellipsenähnliche Form nur innerhalb eines kürzeren Zeitintervalls erhalten, z. B. über drei Blazhko-Perioden. Im Falle von AR Herculis sind das ca. 100 Tage. Die erste Simulation (Abb. 11 links) zeigt die Positionen der Maxima, wenn jedes Maximum beobachtet wird. Bei der zweiten Simulation wurde nur jedes fünfte Maximum (gleichverteilt) beobachtet. Die lockere Anordnung lässt die ›Ellipsenformen‹ kaum noch erkennen. Die dritte Simulation entspricht der zweiten für ein anderes Zeitintervall.

Ob man also bei einem RR-Lyrae-Stern und speziell auch bei AR Herculis eine Ellipsenform im Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramm erkennt, hängt stark von der Differenz der Perioden, der Dichte der Maximumbeobachtungen und dem Zeitintervall innerhalb der Blazhko-Superperiode ab.

Für AR Herculis beträgt bei den gefundenen Blazhko-Perioden von 32.062 Tagen und 29.528 Tagen eine Blazhko-Superperiode von 373.6 Tagen. Somit sollte sich der Drehsinns alle 186.8 Tage umkehren.

Zur Untersuchung dieses Phänomens wurden die Maximumswerte von AR Herculis in Abbildung 12 eingetragen. Die Gesamtheit aller Maxima über den Zeitraum von 2366 Tagen lässt erwartungsgemäß keine ellipsenähnliche Anordnung erkennen.

Um herauszufinden, ob zeitlich hinreichend begrenzte Intervalle solche ellipsenähnlichen Formen ergeben, wurden die Beobachtungen in sieben Zeitintervalle aufgeteilt und jede für sich allein betrachtet. Die Abbildungen 3 und 7 zeigen deutlich diese durch Beobachtungspausen entstandenen Gruppen.

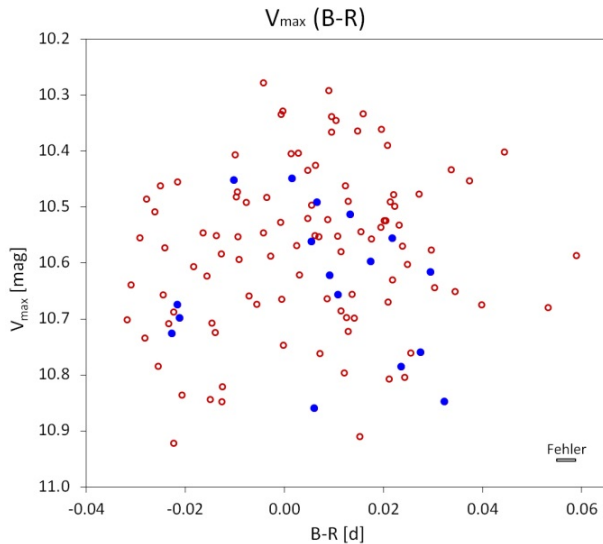


Abbildung 12: Blazhko-Zustandsdiagramm von AR Her, bei dem V_{\max} vs. B-R aufgetragen ist. Die blauen Punkte stellen die Werte eines begrenzten Zeitabschnittes dar. Das Rechteck unten rechts charakterisiert den mittleren Fehler der Beobachtungen.

Am ehesten besitzt das Zeitintervall um HJD 2456500 ein korreliertes Verhalten (blaue Punkte in Abbildung 12 und Abbildung 13).

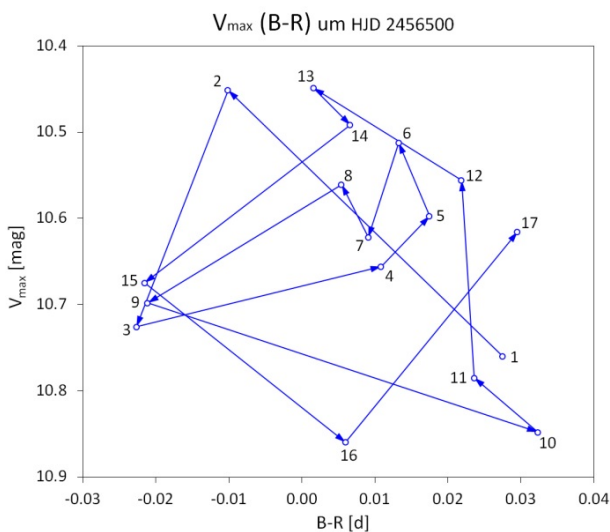


Abbildung 13: Blazhko-Zustandsdiagramm von AR Her, bei dem V_{\max} vs. (B-R) für den Zeitraum HJD 2456432 bis 2456532 aufgetragen ist. Die Nummerierung gibt die chronologische Reihenfolge.

Sortiert man die Messungen chronologisch und verbindet sie mit einer Linie, so zeigt sich schwach eine Drehung (Abbildung 13) gegen den Uhrzeigersinn.

Nimmt man an, dass zwischen den Punkten 3 und 4 ein weiterer Punkt (bei HJD 2456460 \pm 1) in der Nähe von Punkt 16 liegen würde, ergäbe sich eine deutlichere kreisähnliche Form.

Im dargestellten Zeitraum von 100 Tagen werden gut drei vollständige Zyklen umlaufen, d. h. ein Zyklus ist etwa 32 Tage lang. Dieser Wert entspricht genau der zuvor bestimmten Blazhko-Periode.

4 Schlussfolgerungen

Aus der (B-R)-Analyse ergibt sich für den Zeitraum von 2009 bis 2015 ein neuer Wert für die Periode von 0.47999746(\pm 145) Tagen. Dieses Ergebnis bestätigt den unregelmäßigen Verlauf der Perioden über mehr als 100 Jahre. Es scheint so, als ob sich die Periode innerhalb weniger Monate ändert und dann für einige Jahre nahezu konstant bleibt.

Die Analyse der Maximumzeitpunkte zeigt einen deutlichen Blazhko-Effekt mit einer Periode von 32.062(\pm 13) Tagen. Die Analyse der Maximumhelligkeit zeigt einerseits im Zeitraum von 2009 bis 2015 eine Abnahme der Helligkeit um 22 mmag/Jahr und andererseits einen Blazhko-Effekt mit einer Periode von 29.528(\pm 17) Tagen.

Damit besitzt die Maximumhelligkeit einen um ca. 8 % schnelleren Blazhko-Effekt und außerdem langfristige Schwankungen (zurzeit abnehmend). Somit passen 11.65 (B-V)-Blazhko-Perioden in 12.65 V_{\max} -Blazhko-Perioden und ergäben eine Blazhko-Superperiode von 373.6 Tagen. Dies ist auch die Periode im Blazhko (B-R) vs. V_{\max} Diagramm, die sich beispielsweise in der Umkehr des Drehsinns nach der halben Periode bemerkbar macht. Im gleichen Rhythmus dreht die Apsidenlinie und ändert sich die Exzentrizität der (offenen) ›Ellipse‹. Die Umkehr des Drehsinns findet statt, wenn die Ellipsenform zur Geraden entartet.

Kritisch betrachte ich momentan noch die Unterschiedlichkeit der beiden Blazhko-Perioden für B–R und V_{\max} . Eine physikalische Erklärung fehlt hierfür ebenso wie für den Blazhko-Effekt generell. Wie auch bei anderen RR-Lyrae-Sternen könnten auch bei AR Herculis die Maxima ihre Position im Blazhko (B–R) vs. V_{\max} Diagramm auf einer ellipsenähnliche Kurve ändern, wobei nach etwa einem halben Jahr der Drehsinn wechselt. Da nur bei einem einzigen Zeitintervall von 100 Tagen eine hinreichend gut erkennbare Ellipsenform vorliegt, sind dringend weitere Untersuchungen erforderlich. Um dem Ziel der Aufklärung dieses Phänomens zu dienen, müssen in einem Dreimonatszeitraum möglichst viele Maxima (über 50) beobachtet werden. Wichtig ist eine genaue Zeit-und Helligkeitsbestimmung.

Gelingt es, innerhalb eines Jahres mindestens 100 Maxima genau zu bestimmen, könnte eine Aussage über die Exzentrizität, Apsidendrehung und Drehsinn gefunden werden.

Danksagung

Ich danke der American Association of Variable Star Observers (AAVSO) für den Zugang zur AAVSO International Database und den vorne aufgeführten Beobachtern, die die verwendeten Messungen mit großer Sorgfalt vorgenommen haben. Außerdem wurden Beobachtungen der Bundesdeutschen Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne (BAV) verwendet. Ein Hinweis von Peter B. Lehmann auf die Arbeit von Poretti et al. war der Auslöser für die vorliegende Arbeit. Prof. Dr. Lienhard Pagel danke ich für seine Kritik und daraus resultierenden Verfeinerungen.

Referenzen

- Almar, I.: MiBud **51** (1961)
Balázs, Julia & L. Detre: MiBud **8** (1939)
Feast, M.W. et al.: MNRAS **386** (2008), 2115–2134
Hübscher, Joachim: BAV Circular, Heft 1-2016 (a)
Hübscher, Joachim: Datensammlung Rev.13, BAV Mitteilungen, Stand 01.02.2016 (b)
Kholopov, P.N. et al.: GCVS4, I–III (1985–1988)
Klepikova, L.A.: PZ **11**, No. 3 (1957), 137
Lange, G.A.: ATsir **503** (1969), 7–8
Le Borgne, J.-F. et al.: AJ **144** (2012), 39
Lenz, Patrick & M. Breger: CoAst **146** (2005), 53
Pagel, Lienhard: BAV Rundbrief, Heft 3-2008
Poretti, Ennio et al.: arXiv:1601.02772v1 (2016)
The AAVSO International Database (AID), Stand 01.02.2016, www.aavso.org/data-download
The International Variable Star Index (VSX) der AAVSO, Stand 06.02.2016, www.aavso.org/vsx
Weigert, Alfred et al.: ISBN 3-527-40358-2 (2005)
Wils, Patrick et al.: MNRAS **368** (2006), 1757–1763

Anhang

Zeit [HJD] und Helligkeit [mag] der ermittelten Maxima aus dem Zeitraum 2003–2015.

B–R bezieht sich auf $R = \text{HJD } 2454683.4251 + 0.46999746 \cdot E$.

HJD	Fehler	V _{max}	Fehler	B–R	HJD	Fehler	V _{max}	Fehler	B–R
2452744.7152	0.0032	10.5766	0.0024	0.0297	2456054.8884	0.0035	10.5525	0.0027	0.0108
2453489.6905	0.0038	10.5863	0.0018	0.0590	2456062.8640	0.0040	10.4830	0.0026	-0.0036
2453497.6659	0.0018	10.4013	0.0008	0.0444	2456075.5419	0.0139	10.6230	0.0030	-0.0156
2453505.6309	0.0035	10.5361	0.0023	0.0195	2456081.6789	0.0050	10.5795	0.0080	0.0114
2453510.7844	0.0021	10.6209	0.0013	0.0030	2456081.6800	0.0044	10.6975	0.0040	0.0125
2453519.7646	0.0056	10.6795	0.0034	0.0533	2456096.6947	0.0029	10.5840	0.0020	-0.0127
2453536.6514	0.0006	10.5244	0.0001	0.0201	2456116.4621	0.0035	10.3640	0.0030	0.0148
2453817.7271	0.0038	10.4528	0.0053	0.0374	2456126.7845	0.0056	10.5878	0.0057	-0.0028
2454245.3749	0.0034	10.8209	0.0031	-0.0125	2456132.4022	0.0014	10.4620	0.0030	-0.0250
2454255.7672	0.0129	10.6751	0.0162	0.0398	2456154.5261	0.0035	10.2920	0.0030	0.0090
2454260.4618	0.0022	10.6510	0.0012	0.0345	2456431.8431	0.0065	10.7601	0.0028	0.0275
2454276.3946	0.0023	10.8476	0.0014	-0.0127	2456447.7854	0.0021	10.4519	0.0020	-0.0101
2454300.3912	0.0022	10.6984	0.0012	0.0141	2456457.6428	0.0034	10.7262	0.0013	-0.0227
2454596.4548	0.0034	10.8359	0.0033	-0.0207	2456462.8463	0.0019	10.6565	0.0008	0.0109
2454636.4405	0.0031	10.9100	0.0018	0.0152	2456468.4929	0.0042	10.5978	0.0042	0.0175
2454642.5608	0.0038	10.7611	0.0022	0.0255	2456469.4287	0.0035	10.5131	0.0050	0.0133
2454658.5006	0.0025	10.7073	0.0014	-0.0146	2456476.4745	0.0090	10.6222	0.0015	0.0091
2454660.3812	0.0031	10.7239	0.0015	-0.0140	2456477.4108	0.0032	10.5615	0.0027	0.0054
2454879.8763	0.0117	10.4919	0.0259	-0.0077	2456484.4342	0.0025	10.6989	0.0016	-0.0211
2454930.6633	0.0040	10.3608	0.0043	0.0196	2456492.4776	0.0045	10.8483	0.0021	0.0323
2454937.6984	0.0024	10.4340	0.0024	0.0047	2456493.4089	0.0019	10.7854	0.0005	0.0236
2454945.6653	0.0031	10.6062	0.0021	-0.0183	2456500.4571	0.0022	10.5564	0.0011	0.0219
2454975.7543	0.0046	10.5938	0.0042	-0.0092	2456508.4268	0.0034	10.4492	0.0068	0.0016
2455045.7690	0.0045	10.5732	0.0043	-0.0241	2456509.3718	0.0015	10.4920	0.0012	0.0066
2455062.7338	0.0026	10.3899	0.0025	0.0208	2456516.3936	0.0012	10.6751	0.0003	-0.0216
2455281.7523	0.0046	10.5244	0.0051	0.0205	2456525.3511	0.0045	10.8600	0.0069	0.0060
2455294.4118	0.0015	10.4071	0.0010	-0.0100	2456532.4246	0.0020	10.6160	0.0010	0.0295
2455304.7383	0.0033	10.7084	0.0015	-0.0234	2456733.5537	0.0035	10.3290	0.0030	-0.0003
2455311.3720	0.0025	10.6438	0.0005	0.0303	2456742.9222	0.0071	10.7019	0.0110	-0.0317
2455312.7735	0.0043	10.6299	0.0052	0.0218	2456766.9196	0.0017	10.5464	0.0016	-0.0042
2455367.7135	0.0046	10.4855	0.0041	-0.0279	2456767.8544	0.0067	10.5528	0.0181	-0.0094
2455387.4908	0.0047	10.3663	0.0076	0.0095	2456807.7826	0.0023	10.6388	0.0014	-0.0310
2455388.4206	0.0027	10.3341	0.0034	-0.0006	2456819.5722	0.0035	10.5220	0.0030	0.0087
2455394.5175	0.0053	10.5508	0.0058	-0.0137	2456820.5158	0.0035	10.4620	0.0030	0.0123
2455442.5046	0.0015	10.4333	0.0005	0.0336	2456844.4510	0.0010	10.9220	0.0010	-0.0224
2455444.3781	0.0030	10.4764	0.0007	0.0272	2456846.8370	0.0037	10.6562	0.0019	0.0136
2455451.4113	0.0068	10.3452	0.0182	0.0104	2456851.5465	0.0017	10.5318	0.0008	0.0232
2455615.4203	0.0020	10.4823	0.0011	-0.0097	2456853.4209	0.0061	10.5566	0.0146	0.0176
2455640.8162	0.0110	10.4259	0.0463	0.0063	2456860.4588	0.0037	10.4966	0.0056	0.0055
2455647.3804	0.0027	10.4733	0.0026	-0.0095	2456861.3994	0.0019	10.5513	0.0017	0.0061
2455649.7234	0.0064	10.5459	0.0123	-0.0164	2456868.4188	0.0010	10.6570	0.0010	-0.0245
2455662.4412	0.0042	10.6855	0.0026	0.0114	2456873.5850	0.0035	10.7340	0.0030	-0.0282
2455664.8046	0.0041	10.6024	0.0220	0.0248	2456875.4930	0.0035	10.7470	0.0030	-0.0002
2455702.3843	0.0020	10.5200	0.0005	0.0047	2456876.4453	0.0010	10.7961	0.0020	0.0121
2455714.5771	0.0033	10.6875	0.0031	-0.0224	2456884.4470	0.0010	10.5703	0.0020	0.0238
2455716.4503	0.0024	10.5549	0.0013	-0.0292	2456915.4639	0.0035	10.6700	0.0030	0.0209
2455723.5223	0.0067	10.6590	0.0039	-0.0071	2456917.3389	0.0035	10.3330	0.0030	0.0159
2455724.4780	0.0030	10.6643	0.0010	0.0086	2456923.4358	0.0035	10.4040	0.0030	0.0028
2455738.5686	0.0085	10.5275	0.0121	-0.0008	2456924.3743	0.0035	10.4050	0.0030	0.0014
2455739.5051	0.0051	10.2777	0.0121	-0.0043	2457096.8365	0.0010	10.7850	0.0020	-0.0255
2455748.4131	0.0020	10.5087	0.0012	-0.0262	2457184.7460	0.0060	10.6742	0.0067	-0.0055
2455757.8635	0.0050	10.8040	0.0040	0.0242	2457193.6665	0.0110	10.8437	0.0096	-0.0150
2455798.7360	0.0024	10.5530	0.0020	0.0070	2457201.6869	0.0046	10.5439	0.0121	0.0154
2455806.7184	0.0020	10.6645	0.0009	-0.0006	2457203.5728	0.0060	10.4905	0.0096	0.0214
2455810.4574	0.0023	10.4550	0.0020	-0.0216	2457204.5137	0.0029	10.4985	0.0022	0.0223
2455834.4584	0.0026	10.3382	0.0025	0.0096	2457229.4224	0.0038	10.8070	0.0018	0.0211
2456047.8349	0.0057	10.7618	0.0071	0.0072	2457237.4133	0.0026	10.4783	0.0023	0.0220
2456049.7205	0.0036	10.7218	0.0032	0.0128	2457245.3941	0.0008	10.4897	0.0005	0.0129