

O-C-Analyse und langfristige Periodenänderung des EW-Sterns CSS J214040.3+244155

Dieter Husar und Thomas Rudolph

Abstract: *An O-C analysis of the EW eclipsing binary CSS_J214040.3+244155 is presented, based on our own observations and minima from various photometric surveys. Particular attention is paid to the plausibility check of the cycle count and the consistent weighting of heterogeneous minima. The O-C data can be described significantly better by a parabolic ephemeris than by a linear model. This results in a statistically significant, long-term period change. The work underscores the importance of careful methodological scrutiny in O-C investigations of EW systems.*

Zusammenfassung

Es wird eine O-C-Analyse des EW-Bedeckungsveränderlichen CSS_J214040.3+244155 vorgestellt, basierend auf eigenen Beobachtungen sowie auf Minima aus verschiedenen photometrischen Surveys. Besonderes Augenmerk liegt auf der Plausibilitätsprüfung der Zykluszählung und der konsistenten Gewichtung heterogener Minima. Die O-C-Daten lassen sich durch eine parabolische Ephemeride deutlich besser beschreiben als durch ein lineares Modell. Daraus ergibt sich eine statistisch signifikante, langfristige Periodenänderung. Die Arbeit unterstreicht die Bedeutung einer sorgfältigen methodischen Absicherung bei O-C-Untersuchungen von EW-Systemen.

1. Einleitung

Der hier untersuchte Stern CSS_J214040.3+244155 im Sternbild Pegasus wurde vom Catalina Survey als Kontakt-Doppelstern vom Typ EW klassifiziert, mit einer Periode von $P=0.320644$ [d] [1]. Die Helligkeit beträgt ca. 15.30–15.66 [mag V]. Der Lichtwechsel der EW-Systeme zeichnet sich durch kurze Umlaufperioden ($<1d$) und nahezu kontinuierliche Helligkeitsänderungen aus, wodurch diese Sterne besonders für O-C-Untersuchungen über längere Zeiträume geeignet sind.

Für CSS_J214040.3+244155 lag bislang eine lineare Ephemeride mit konstanter Periode vor [1]. Durch die Verfügbarkeit eigener Beobachtungen sowie von Minima aus mehreren photometrischen Surveys steht inzwischen eine deutlich erweiterte Zeitbasis zur Verfügung, die eine Überprüfung der Periodenstabilität erlaubt.

Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung einer O-C-Analyse auf Basis dieser heterogenen Datenbasis. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der methodischen Absicherung der Zykluszählung und der gewichteten Behandlung der Minima unterschiedlicher Herkunft und Genauigkeit. Auf dieser Grundlage wird untersucht, ob die Beobachtungsdaten durch eine lineare Ephemeride ausreichend beschrieben werden können oder ob eine langfristige Periodenänderung vorliegt.

2. Beobachtungsdaten

2.1 Eigene Beobachtungen

An der SATINO Remote-Sternwarte [2] wurden mit dem 20-cm-Teleskop (Satino-1) und dem 30-cm-Teleskop (Satino-2) in den Jahren 2024 und 2025 regelmäßig Beobachtungen an RR-Lyrae-Veränderlichen von D. Husar durchgeführt. In der Regel wird hier mit einer CMOS-Kamera (ASI294MMPro) ohne Filter mit Belichtungszeiten von 10 bis 30 Sekunden gearbeitet. Die Kalibrierung, das Plate-Solving und die Ausrichtung der Aufnahmen erfolgten mit der Software Tycho-Tracker [3]. Für die Photometrie wurde Phoranso [4] und zur Ermittlung der Minimumszeiten wurde Peranso [5] verwendet.

Bei diesen Beobachtungen werden gelegentlich weitere bekannte Veränderliche im beobachteten Feld mit beobachtet. Der Veränderliche CSS J214040.3+244155 wurde auf diese Weise im Feld (FoV = Field of View) von CG Peg in 9 Nächten beobachtet ($n_{\text{obs}}=1562$). Das Auffinden weiterer Objekte im FoV wird dadurch erleichtert, dass sowohl Tycho, als auch Phoranso alle im FoV bekannten Veränderlichen mit ihren Daten (Typ, Amplitude, Periode etc.) anzeigen können und damit leicht für weitere Auswertungen zugänglich machen.

Zusätzlich konnte noch eine ältere Beobachtungsserie aus dem Jahr 2008 herangezogen werden. Diese Beobachtungsserie ($n_{\text{obs}}=143$) wurde seinerzeit mit dem 40-cm-Teleskop ($f=2750$ mm) am Standort Hamburg (IAU-Station: 637) mit einer SBIG ST8E (2x2 binning) am 24.07.2008 durch D. Husar aufgenommen.

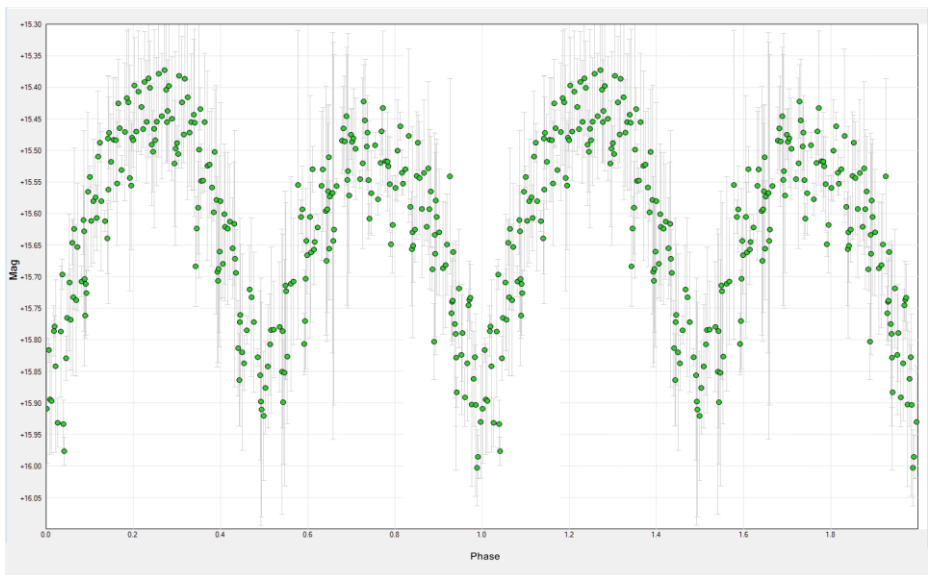


Abbildung 1: Mit $P=0.320655$ [d] gefaltetes Phasendiagramm der Beobachtungen aus 2024-2025 mit den SATINO-Teleskopen.

2.2 Survey-Daten

Ergänzend zu den eigenen Beobachtungen wurden Minima aus verschiedenen photometrischen Surveys herangezogen [6][7][8][9][10][11]. Diese Daten erweitern die zeitliche Basis der O-C-Analyse erheblich und ermöglichen die Untersuchung langfristiger Periodeneffekte. Übernommen wurden ausschließlich Messungen, deren Herkunft und zeitliche Referenz eindeutig dokumentiert sind.

Eine besondere Herausforderung stellte die Gewinnung geeigneter Minima aus TESS-Daten dar. Aufgrund der missionsspezifischen Eigenschaften der TESS-Lichtkurven wurde hierfür eine eigene Softwarelösung entwickelt, die die zeitliche Abtastung, die photometrische Systematik sowie die begrenzte zeitliche Abdeckung einzelner Sektoren berücksichtigt.

Insbesondere die TESS-Daten erwiesen sich als wesentlich für die Reduktion der zuvor größeren zeitlichen Lücke im O-C-Diagramm und trugen damit entscheidend zur Absicherung der Zykluszahlung über den gesamten untersuchten Zeitraum bei.

3. Bestimmung der Minima

3.1 Methode der Minimumsbestimmung

Die Zeitpunkte der Minima wurden überwiegend direkt aus einzelnen Lichtkurven bestimmt. Hierzu wurde die Software Peranso [5] verwendet; die Minimumszeiten wurden mittels Polynomfit im jeweiligen Minimumsbereich ermittelt. Diese Vorgehensweise liefert für gut aufgelöste Lichtkurven präzise und reproduzierbare Minimumszeiten.

In wenigen Fällen, insbesondere bei Daten mit begrenzter zeitlicher Abdeckung, wurden Minima aus Phasenkurven abgeleitet. Solche Phasenminima weisen aufgrund der Mittelung über mehrere Zyklen größere zeitliche Unsicherheiten auf als Einzelminima aus Lichtkurven.

3.2 Unsicherheiten der Minima

Die zeitlichen Unsicherheiten der Minima wurden für jede Messung individuell ermittelt und in der Minimumstabelle dokumentiert. Phasenminima mit größeren Unsicherheiten sind im O-C-Diagramm gesondert gekennzeichnet.

Bei der Ephemeridenbestimmung wurden die Minima entsprechend ihrer Unsicherheit gewichtet, sodass weniger genaue Phasenminima einen geringeren Einfluss auf den Fit haben als präzise Einzelminima. Auf diese Weise wird die heterogene Datenqualität konsistent berücksichtigt.

4. Ausgangsephemeride und lineares O-C

4.1 Ausgangsephemeride

Für den untersuchten EW-Stern lag aus der Literatur [1] lediglich eine Umlaufperiode vor, während keine Referenzepoche T_0 publiziert war. Als Ausgangsephemeride wurde daher eine lineare Ephemeride auf Basis dieser Periode verwendet.

Als Referenzepoche T_0 wurde das zeitlich erste, sicher bestimmte Primärminimum aus einer gut aufgelösten Lichtkurve gewählt. Diese Wahl stellt eine eindeutige und reproduzierbare Definition der Zykluszahlung sicher.

4.2 Lineares O–C-Diagramm

Auf Grundlage dieser Ausgangsephemeride wurde ein lineares O–C-Diagramm erstellt. Die resultierenden O–C-Werte zeigen systematische Abweichungen von der linearen Ephemeride, die nicht durch zufällige Streuung erklärt werden können. Diese Abweichungen motivieren die Untersuchung erweiterter Ephemeridenmodelle, wobei das lineare O–C-Diagramm als Referenz für die nachfolgende Analyse dient.

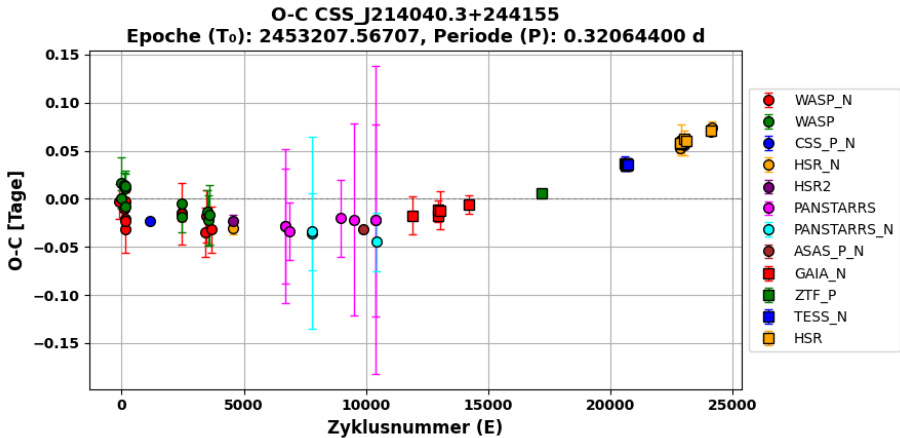


Abbildung 2: Lineares O-C Diagramm

5. Plausibilitätsprüfung der Zykluszahl

Die Zykluszahl wurde auf ihre physikalische Plausibilität geprüft. Für EW-Systeme sind nur langsame, langfristige Periodenänderungen zu erwarten, während abrupte Epochensprünge physikalisch nicht plausibel sind. Aufgrund zeitlicher Lücken in den Beobachtungsdaten wäre formal eine alternative Zykluszahl möglich. Mehrere zeitlich gut aufgelöste und sicher identifizierte Primärminima wurden daher als Ankerpunkte verwendet. An diesen Ankerpunkten wurden die O–C-Abweichungen für alternative Zykluszuordnungen überprüft; diese würden zu physikalisch nicht plausiblen Abweichungen führen und können daher ausgeschlossen werden.

6. Gewichtung der Minima und Fitverfahren

Die zur Ephemeridenbestimmung verwendeten Minima umfassen sowohl Phasenminima mit größeren zeitlichen Unsicherheiten als auch Einzelminima aus Lichtkurven unterschiedlicher Herkunft. Die Ephemeridenparameter wurden mittels gewichteter kleinsten Quadrate bestimmt. Als Gewicht wurde $w = 1/\sigma^2$ verwendet, wobei σ der in der Minimumstabelle angegebenen zeitlichen Unsicherheit des jeweiligen Minimums entspricht. Dadurch tragen Minima mit geringerer Genauigkeit entsprechend schwächer zum Fit bei.

7. Parabolische Ephemeride

Die O–C-Daten wurden mit einem parabolischen Modell $O-C(E) = aE^2 + bE + c$ gefittet. Der Fit erfolgte mittels gewichteter kleinster Quadrate unter Verwendung der zeitlichen Unsicherheiten der einzelnen Minima ($w = 1/\sigma^2$). Alle Zeitangaben beziehen sich auf HJD (UTC). Aus dem parabolischen Term ergibt sich eine langfristige Periodenänderung von $dP/dt = +0.069$ s/Jahr.

Die resultierende Ephemeride kann in der Form $T(E) = T_0' + P'E + \frac{1}{2} \cdot (dP/dt) \cdot E^2$ geschrieben werden mit $T_0' = 2453207.55500$ d und $P' = 0.32063896$ d. Der parabolische Fit reduziert die Streuung der Residuen gegenüber dem linearen Modell deutlich.

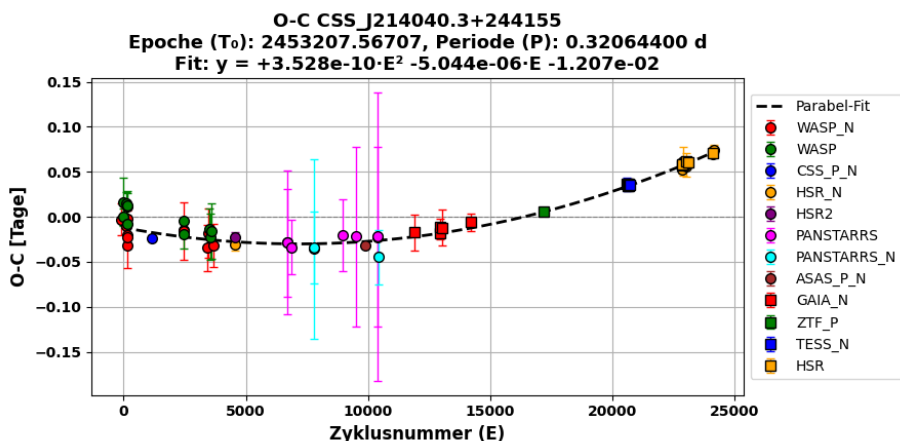


Abbildung 3: O-C Diagramm mit Parabelfit

Parameter	Wert	Einheit
T_0'	2453207.56	d
P'	0.32063896	d
dP/dt	0.069	s/Jahr
a	3.528×10^{-10}	d
χ^2 (linear)	547.5	
χ^2 (parabolisch)	61.6	

Tabelle 1: Ergebnisse des parabolischen O–C-Fits (HJD, UTC).

Anmerkungen zu Tabelle 1:

T_0' bezeichnet die korrigierte Referenzeпоche des Primärminimums der parabolischen Ephemeride.

P' ist die korrigierte mittlere Umlaufperiode des Systems.

dP/dt gibt die zeitliche Änderungsrate der Periode an; ein positiver Wert entspricht einer zunehmenden Periode.

Der Parameter a ist der quadratische Koeffizient des Parabelfits im O-C-Diagramm.

χ^2 (Chi-Quadrat) ist ein Maß für die Güte der Anpassung eines Modells an die Daten; kleinere Werte kennzeichnen eine bessere Anpassung.

Die den Fits zugrunde liegenden Minima sowie die berechneten O-C-Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

E	O	C	OC_d	OC_h	Fehler	Quelle	Typ	Marker
-96	2453176.6220	2453176.6249	-0.0029	-0.07	0.0180	WASP_N	Nebenminimum	U
-28	2453198.6056	2453198.5890	0.0165	0.40	0.0264	WASP	Hauptminimum	U
0	2453207.5671	2453207.5671	0.0000	0.00	0.0090	WASP	Hauptminimum	H1
87	2453235.4775	2453235.4631	0.0144	0.35	0.0132	WASP	Hauptminimum	N1
88	2453235.6136	2453235.6234	-0.0098	-0.23	0.0091	WASP_N	Nebenminimum	H1
140	2453252.4490	2453252.4572	-0.0083	-0.20	0.0098	WASP	Hauptminimum	N1
140	2453252.6151	2453252.6176	-0.0024	-0.06	0.0089	WASP_N	Nebenminimum	H1
143	2453253.5671	2453253.4192	0.0116	0.28	0.0150	WASP	Hauptminimum	U
143	2453253.5587	2453253.5795	-0.0208	-0.50	0.0100	WASP_N	Nebenminimum	H1
149	2453255.4715	2453255.5033	-0.0318	-0.76	0.0246	WASP_N	Nebenminimum	U
152	2453256.4425	2453256.4653	-0.0228	-0.55	0.0112	WASP_N	Nebenminimum	H1
159	2453258.5626	2453258.5495	0.0131	0.31	0.0160	WASP	Hauptminimum	H1
1158	2453579.0097	2453579.0331	-0.0235	-0.56	0.0026	CSS_P_N	Nebenminimum	H1
2457	2453995.3847	2453995.3894	-0.0047	-0.11	0.0032	WASP	Hauptminimum	H2
2457	2453995.5355	2453995.5497	-0.0142	-0.34	0.0087	WASP_N	Nebenminimum	N2
2466	2453998.4197	2453998.4355	-0.0158	-0.38	0.0320	WASP_N	Nebenminimum	U
2476	2454001.4629	2454001.4816	-0.0187	-0.45	0.0166	WASP	Hauptminimum	U
3425	2454305.5781	2454305.6124	-0.0344	-0.83	0.0256	WASP_N	Nebenminimum	U
3478	2454322.5888	2454322.6066	-0.0178	-0.43	0.0272	WASP_N	Nebenminimum	U
3493	2454327.5631	2454327.5766	-0.0135	-0.32	0.0222	WASP	Hauptminimum	U
3568	2454351.6025	2454351.6249	-0.0223	-0.54	0.0260	WASP	Hauptminimum	U
3574	2454353.5324	2454353.5487	-0.0164	-0.39	0.0308	WASP	Hauptminimum	U
3668	2454383.4969	2454383.5289	-0.0321	-0.77	0.0240	WASP_N	Nebenminimum	U
4569	2454672.3984	2454672.4292	-0.0308	-0.74	0.0062	HSR_N	Nebenminimum	H2
4569	2454672.5667	2454672.5895	-0.0228	-0.55	0.0057	HSR2	Hauptminimum	N2
6682	2455350.0816	2455350.1103	-0.0287	-0.69	0.0600	PANSTARRS	Hauptminimum	U
6682	2455350.0820	2455350.1103	-0.0283	-0.68	0.0800	PANSTARRS	Hauptminimum	U
6866	2455409.0750	2455409.1088	-0.0338	-0.81	0.0300	PANSTARRS	Hauptminimum	N2
7774	2455700.0576	2455700.0932	-0.0356	-0.85	0.1000	PANSTARRS_N	Nebenminimum	U
7774	2455700.0590	2455700.0932	-0.0342	-0.82	0.0400	PANSTARRS_N	Nebenminimum	U
8971	2456084.0440	2456084.0644	-0.0204	-0.49	0.0400	PANSTARRS	Hauptminimum	U
9525	2456261.6793	2456261.7012	-0.0218	-0.52	0.1000	PANSTARRS	Hauptminimum	U
9897	2456380.7888	2456380.8204	-0.0316	-0.76	0.0031	ASAS_P_N	Nebenminimum	H1
10371	2456532.9436	2456532.9660	-0.0224	-0.54	0.1000	PANSTARRS	Hauptminimum	U
10380	2456535.8299	2456535.8518	-0.0219	-0.53	0.1600	PANSTARRS	Hauptminimum	U
10449	2456557.7710	2456557.8159	-0.0449	-1.08	0.0300	PANSTARRS_N	Nebenminimum	H2
11880	2457016.6400	2457016.6575	-0.0174	-0.42	0.0200	GAIA_N	Nebenminimum	H2
12971	2457366.4619	2457366.4801	-0.0181	-0.44	0.0064	GAIA_N	Nebenminimum	H1
12971	2457366.4684	2457366.4801	-0.0117	-0.28	0.0100	GAIA_N	Nebenminimum	H2
13052	2457392.4403	2457392.4522	-0.0120	-0.29	0.0200	GAIA_N	Nebenminimum	H2
14223	2457767.9203	2457767.9264	-0.0060	-0.14	0.0100	GAIA_N	Nebenminimum	H2
17196	2458721.3666	2458721.3613	0.0053	0.13	0.0024	ZTF_P	Hauptminimum	H1
20572	2459804.0521	2459804.0158	0.0364	0.87	0.0074	TESS_N	Nebenminimum	H1
20613	2459817.1964	2459817.1622	0.0342	0.82	0.0045	TESS_N	Nebenminimum	H1
20649	2459828.7422	2459828.7053	0.0368	0.88	0.0048	TESS_N	Nebenminimum	H1
20669	2459835.1529	2459835.1182	0.0347	0.83	0.0054	TESS_N	Nebenminimum	H1
20691	2459842.2092	2459842.1724	0.0368	0.88	0.0043	TESS_N	Nebenminimum	H1
20711	2459848.6212	2459848.5853	0.0359	0.86	0.0056	TESS_N	Nebenminimum	H1
22834	2460529.3649	2460529.3125	0.0524	1.26	0.0048	HSR_N	Nebenminimum	N1
22835	2460529.5308	2460529.4728	0.0580	1.39	0.0037	HSR	Hauptminimum	H1
22855	2460536.1032	2460536.0460	0.0572	1.37	0.0029	TESS_N	Nebenminimum	U
22878	2460543.4823	2460543.4208	0.0615	1.48	0.0158	HSR_N	Nebenminimum	U
22881	2460544.4432	2460544.3828	0.0604	1.45	0.0041	HSR_N	Nebenminimum	H1
22882	2460544.7613	2460544.7034	0.0579	1.39	0.0061	TESS_N	Nebenminimum	H1
22894	2460548.6091	2460548.5511	0.0579	1.39	0.0053	TESS_N	Nebenminimum	H1
22925	2460558.5503	2460558.4911	0.0592	1.42	0.0037	TESS_N	Nebenminimum	H1
23037	2460594.3049	2460594.2429	0.0620	1.49	0.0090	HSR	Hauptminimum	U
23037	2460594.4587	2460594.4032	0.0555	1.33	0.0104	HSR_N	Nebenminimum	U
23106	2460616.4275	2460616.3673	0.0602	1.44	0.0054	HSR	Hauptminimum	H1
24120	2460941.4096	2460941.3400	0.0696	1.67	0.0032	HSR_N	Nebenminimum	H1
24123	2460942.3749	2460942.3020	0.0730	1.75	0.0048	HSR_N	Nebenminimum	U
24126	2460943.3350	2460943.2639	0.0711	1.71	0.0029	HSR_N	Nebenminimum	H1
24126	2460943.4954	2460943.4242	0.0712	1.71	0.0042	HSR	Hauptminimum	N1
24147	2460950.3919	2460950.3181	0.0738	1.77	0.0064	HSR_N	Nebenminimum	U

Tabelle 2: Ermittelte (O) und berechnete (C) Zeitpunkte der Minima

8. Interpretation und Grenzen

Die gefundene parabolische O-C-Entwicklung weist auf eine langsame, langfristige Periodenänderung des EW-Systems hin. Die Größenordnung der bestimmten Periodenänderung liegt im Bereich typischer Werte für Kontakt-Doppelsterne und ist mit langfristigen evolutionären Effekten wie Massentransfer oder Drehimpulsverlust vereinbar.

Aus der vorliegenden Datenbasis lassen sich jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf den zugrunde liegenden physikalischen Mechanismus ziehen. Insbesondere können aus der parabolischen Ephemeride weder eine spezifische Massentransferrate noch Hinweise auf zusätzliche periodische Modulationen oder eine Drittkomponente abgeleitet werden.

Die Interpretation ist zudem durch zeitliche Lücken in den Beobachtungsdaten begrenzt. Weitere präzise bestimmte Minima über einen längeren Zeitraum sind erforderlich, um die langfristige Entwicklung der Periode weiter abzusichern.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine O-C-Analyse des EW-Sterns auf Basis eigener Beobachtungen und von Survey-Daten durchgeführt. Durch eine explizite Plausibilitätsprüfung der Zykluszahlung sowie eine gewichtete Behandlung der Minima konnte eine robuste parabolische Ephemeride bestimmt werden.

Der parabolische Term weist auf eine statistisch signifikante, langsame Periodenänderung hin und wird gegenüber einer linearen Ephemeride klar bevorzugt. Die Analyse unterstreicht die Bedeutung einer sorgfältigen Qualitätsbewertung heterogener Minima bei O-C-Untersuchungen von EW-Systemen.

Weitere präzise bestimmte Minima sind notwendig, um die langfristige Periodenentwicklung weiter zu verfolgen und mögliche zusätzliche Effekte besser einzugrenzen.

10. Datenquellen und Danksagung

Diese Arbeit nutzt photometrische Daten aus verschiedenen öffentlich zugänglichen Surveys [6 - 11]. Die Autoren danken den jeweiligen Projektteams für die Bereitstellung der Daten sowie der zugehörigen Infrastruktur.

11. Literatur:

- [1] Drake, A. J. et al. (2009 & 2014): "First Results from the Catalina Real-time Transient Survey", ApJ, 696, 870 und A. J. Drake et al 2014 ApJS 213 9
- [2] SATINO-Projekt der „Stiftung Interaktive Astronomie und Astrophysik“:
<https://stiftung-astronomie.org/ueber-satino/>
- [3] Tycho-Tracker : <https://www.tycho-tracker.com/>
- [4] Phoranso: <https://www.cbabelgium.com/Phoranso/>
- [5] Peranso: <https://www.cbabelgium.com/peranso/>
- [6] Pojmanski, G. (2002), Acta Astron., 52, 397, 43-50.
- [7] Gaia Collaboration (2022): "Gaia Data Release 3", A&A, 670, A45
- [8] Chambers, K. C., et al. (2016). The Pan-STARRS1 Surveys. arXiv:1612.05560.
- [9] Ricker, G. R., et al. (2015), Instruments, and Systems, 1, 014003.
- [10] Butters, O.W. et al. (2010): "The SuperWASP Variable Star Catalog", A&A, 520, L10
- [11] Masci, F. J., et al. (2019). ZTF Science Data Processing System. ArXiv:1902.05513.

Kontakt Daten der Autoren: Dr. Dieter Husar / Hamburg, husar.d@gmx.de
und Thomas Rudolph / Dresden, thomas@fam-rudolph.eu