

Entfernter Begleiter des EW-Bedeckungsveränderlichen CSS J224114.8+263531 mittels Lichtlaufzeiteffekt entdeckt

Evidence for a Companion in the system of the EW Binary
CSS J224114.8+263531 from a Light-Travel-Time Effect

Dieter Husar und Thomas Rudolph

Zusammenfassung: Der Veränderliche CSS J224114.8+263531 wurde durch die CSS-Durchmusterung entdeckt und ist als EW-Bedeckungsveränderlicher klassifiziert [1,2]. Der Veränderliche befindet sich im gleichen Feld wie ET Peg. Beide Sterne wurden daher zusammen beobachtet. Wir konnten 300 einzelne CV-Helligkeiten messen. Wir präsentieren hier die Beobachtungen des EW-Sterns aus dem Jahr 2024 mit Bestimmungen seiner Minima, zusammen mit einer Auswertung historischer Daten aus verschiedenen Himmelsdurchmusterungen (NSVS, WASP, SuperWASP und ZTF). Durch die Kombination aller verfügbarer Beobachtungen über einen Zeitraum von über 20 Jahren, konnte ein deutlicher Lichtlaufzeiteffekt (LiTE) im O-C-Diagramm nachgewiesen werden. Dieser deutet auf einen dritten Körper im System hin, der das enge Binärsystem umkreist. Eine LiTE-Modellierung ergibt eine Umlaufperiode von ungefähr 31 Jahren und eine minimale Begleitermasse von ca. 0,3 Sonnenmassen.

Abstract: The variability of CSS J224114.8+263531 was discovered by CSS and is classified as EW type binary [1,2]. The variable is located in the same FoV as ET Peg. Both stars were photometrically monitored during 2024. We obtained 300 single magnitude measurements in CV-band. Here we discuss new results of the EW binary, combining the new minima timings with collected archival data from NSVS WASP, SuperWASP and ZTF. We have constructed an O-C diagram spanning some 20 years. The data show a clear light-travel-time effect (LiTE) consistent with a third body orbiting the contact binary. A LiTE-fit yield a period of ~31 years and a minimum companion mass of $\sim 0.3 M\odot$. This supports the presence of a distant companion.

1. Beobachtungen und Datengrundlagen

An der SATINO-Remote-Sternwarte [3] werden mit dem 20-cm-Teleskop (Satino-1) und dem 30-cm-Teleskop (Satino-2) regelmäßig Beobachtungen an RR-Lyrae-Veränderlichen durchgeführt. In der Regel wird hier mit einer CMOS-Kamera (ASI294MMP) ohne Filter mit Belichtungszeiten von 10 bis 30 Sekunden gearbeitet. Die Kalibrierung, das Plate-Solving und das Alignment der Aufnahmen erfolgt mit der Software Tycho-Tracker [4]. Für die Photometrie wurde Phoranso [5] und zur Ermittlung der Minimumszeiten wurde Peranso [6] verwendet.

Bei diesen Beobachtungen werden gelegentlich weitere bekannte Veränderliche im beobachteten Feld mit beobachtet. Der Veränderliche CSS J224114.8+263531 wurde so im Feld (FoV = Field of View) von ET Peg in 6 Nächten beobachtet und zusammen mit diesem Veränderlichen ausgewertet. 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.

Es lag daher nahe, den hier diskutierten CSS-Veränderlichen auszuwählen und dessen Minimumszeiten aus den 300 Einzelmessungen zu ermitteln, sowie diese zusammen mit weiteren allgemein im Internet zugänglichen Survey-Daten auszuwerten.

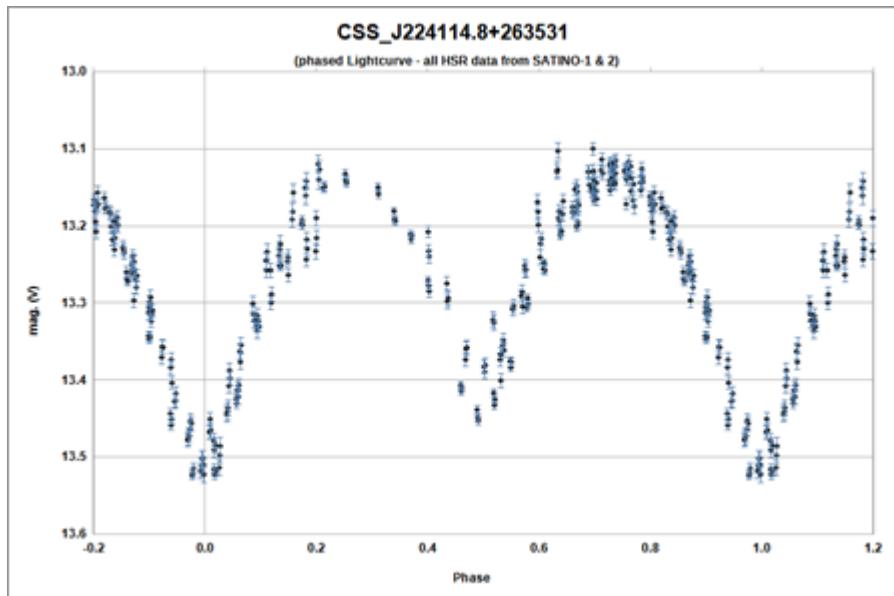


Abbildung 1: Gefaltete Lichtkurve von CSS J224114.8+263531 aus den eigenen Beobachtungen (2024). Helligkeiten beziehen sich auf das CV-Band (keine Filterung).

Allein aus den zur Periodenbestimmung benutzten eigenen Beobachtungen zeigt sich zunächst noch kein signifikanter Unterschied zur Originalperiode aus der CSS-Veröffentlichung.

$$(1) \quad \text{MIN} = \text{HJD } 2460544.325 + 0.476167 \text{ [d]} \times E$$

Der Fehler von P beträgt ca. 0.000012 [d].

Anmerkung: im ATLAS-Katalog [18] wird der Veränderliche etwas abweichend als Typ CBF klassifiziert und mit einer Periode von $P = 0.476178$ [d] angegeben. (CBF= Close binary, full period. These stars are contact or near-contact eclipsing binaries for which the Fourier fit has found the correct period and hence fit the primary and secondary eclipses separately.)

Aus den verschiedenen Survey-Daten und den eigenen Daten aus 2024 konnten die Elemente (Ausgangsepoke E0 und Periode) im Wesentlichen bestätigt werden. Die

wahre Natur des Doppelsternsystems offenbarte sich dann aber in der Zusammenfassung aller Daten und in der folgenden O-C-Analyse.

Die folgende Tabelle enthält Daten aus den Quellen:

HSR (eigene Daten, Dieter Husar)

WASP und SuperWASP Photometrie (Pollacco et al. 2006) [7,8]

Daten des ZTF DR19 (Bellm et al. 2019) [9] via IRSA ZTF Lightcurve Service

ASAS-SN SkyPatrol V2.0 [10,11]

Es konnten zahlreiche Minima und Nebenminima (ToM = Time of Minimum) extrahiert werden. Die Genauigkeit der Minimumszeiten ist je nach Qualität der Originaldaten je nach Survey recht unterschiedlich (Anzahl der Messpunkte, Qualität der Photometrie) und wird durch den ermittelten Fehler der ToM angegeben (alle ToM siehe Tabelle 1).

E	O	C	O-C [d]	O-C [h]	Fehler	Quelle
-15	2453170.5062	2453170.5062	-0.0001	0.00	0.0045	WASP_P
0	2453177.6489	2453177.6489	0.0000	0.00	0.0041	SuperWASP
11	2453182.8887	2453182.8868	0.0019	0.05	0.0055	SuperWASP_N
32	2453192.8916	2453192.8865	0.0051	0.12	0.0060	SuperWASP_N
40	2453196.699	2453196.6959	0.0031	0.07	0.0051	SuperWASP
42	2453197.6487	2453197.6483	0.0004	0.01	0.0053	SuperWASP
44	2453198.5998	2453198.6006	-0.0008	-0.02	0.0050	SuperWASP
59	2453205.7441	2453205.7433	0.0008	0.02	0.0049	WASP_P
109	2453229.5544	2453229.5521	0.0023	0.05	0.0062	SuperWASP
111	2453230.5072	2453230.5044	0.0028	0.07	0.0049	SuperWASP
128	2453238.6063	2453238.5994	0.0069	0.17	0.0051	SuperWASP
130	2453239.5516	2453239.5518	-0.0002	0.00	0.0077	SuperWASP
132	2453240.5055	2453240.5041	0.0014	0.03	0.0031	SuperWASP
134	2453241.4563	2453241.4565	-0.0001	0.00	0.0075	SuperWASP_N
136	2453242.4088	2453242.4088	0.0000	0.00	0.0060	SuperWASP_N
139	2453243.8386	2453243.8373	0.0012	0.03	0.0063	SuperWASP_N
141	2453244.7883	2453244.7897	-0.0014	-0.03	0.0090	WASP_P
142	2453245.2643	2453245.2659	-0.0015	-0.04	0.0038	SuperWASP_N
149	2453248.6123	2453248.5991	0.0132	0.32	0.0099	SuperWASP
151	2453249.545	2453249.5515	-0.0064	-0.15	0.0081	SuperWASP
1616	2453947.1561	2453947.1493	0.0068	0.16	0.0048	WASP_P
1650	2453963.3463	2453963.3393	0.0070	0.17	0.0035	WASP_P
1705	2453989.5371	2453989.529	0.0081	0.19	0.0078	SuperWASP
1705	2453989.5394	2453989.529	0.0104	0.25	0.0094	SuperWASP
1707	2453990.4833	2453990.4813	0.0020	0.05	0.0071	SuperWASP
1707	2453990.4836	2453990.4813	0.0023	0.06	0.0063	SuperWASP
1709	2453991.4436	2453991.4337	0.0099	0.24	0.0052	SuperWASP
1714	2453993.824	2453993.8145	0.0094	0.23	0.0054	SuperWASP_N
1714	2453993.8277	2453993.8145	0.0132	0.32	0.0049	SuperWASP_N
1716	2453994.7793	2453994.7669	0.0124	0.30	0.0075	SuperWASP_N
1718	2453995.7297	2453995.7192	0.0104	0.25	0.0058	SuperWASP_N
1718	2453995.7299	2453995.7192	0.0107	0.26	0.0057	SuperWASP_N

E	O	C	O-C [d]	O-C [h]	Fehler	Quelle
1729	2454000.9653	2454000.9572	0.0081	0.19	0.0159	WASP_P
1820	2454044.2977	2454044.2892	0.0085	0.20	0.0109	WASP_P
1846	2454056.6774	2454056.6698	0.0076	0.18	0.0053	SuperWASP_N
1848	2454057.6344	2454057.6221	0.0123	0.29	0.0064	SuperWASP_N
1869	2454067.6384	2454067.6218	0.0166	0.40	0.0063	SuperWASP_N
6408	2456228.9999	2456228.9847	0.0152	0.37	0.0027	ASAS_P
6409	2456229.4792	2456229.4609	0.0183	0.44	0.0013	ASAS_P
6569	2456305.666	2456305.649	0.0170	0.41	0.0040	ASAS_P
8309	2457134.2075	2457134.1953	0.0123	0.29	0.0028	ASAS_P
8310	2457134.6828	2457134.6714	0.0113	0.27	0.0036	ASAS_P
8459	2457205.6327	2457205.6217	0.0111	0.27	0.0044	ASAS_P
10892	2458364.1589	2458364.1579	0.0010	0.02	0.0116	ZTF_P
11363	2458588.4371	2458588.4368	0.0003	0.01	0.0011	ASAS_P
11364	2458588.9132	2458588.9129	0.0002	0.01	0.0016	ASAS_P
11683	2458740.8148	2458740.8131	0.0017	0.04	0.0113	ZTF_P
11825	2458808.4267	2458808.4301	-0.0034	-0.08	0.0107	ASAS_P
11826	2458808.9028	2458808.9063	-0.0035	-0.08	0.0108	ASAS_P
12287	2459028.4163	2459028.4234	-0.0070	-0.17	0.0213	ASAS_P
12288	2459028.8924	2459028.8996	-0.0072	-0.17	0.0214	ASAS_P
12456	2459108.8955	2459108.8971	-0.0016	-0.04	0.0099	ZTF_P
13654	2459679.3523	2459679.356	-0.0037	-0.09	0.0029	ASAS_P
13655	2459679.8288	2459679.8322	-0.0033	-0.08	0.0022	ASAS_P
13963	2459826.4914	2459826.4944	-0.0030	-0.07	0.0107	ZTF_P
14021	2459854.1059	2459854.1126	-0.0066	-0.16	0.0089	ASAS_P
14022	2459854.5825	2459854.5888	-0.0063	-0.15	0.0088	ASAS_P
14389	2460029.3358	2460029.3453	-0.0096	-0.23	0.0172	ASAS_P
14390	2460029.8123	2460029.8215	-0.0092	-0.22	0.0171	ASAS_P
15471	2460544.5603	2460544.5678	-0.0074	-0.18	0.0029	HSR
15563	2460588.364	2460588.376	-0.0119	-0.29	0.0021	HSR
15575	2460594.0808	2460594.0901	-0.0093	-0.22	0.0034	HSR_N
15624	2460617.4117	2460617.4227	-0.0110	-0.26	0.0026	HSR
15680	2460644.0778	2460644.0886	-0.0107	-0.26	0.0027	HSR_N

,
Tabelle1: ermittelte (O)- und berechnete (C)-Zeitpunkte der Minima (ToM), O-C. Quellenangaben

2. O-C-Diagramm und LiTE-Modellierung

Die von uns ermittelten Minima und Nebenminima ("O" = observed) erlauben unter Annahme einer bestimmten Ausgangsepoke und einer bekannten Periode die Berechnung der Minimumszeiten ("C" = calculated) und damit der Werte der Abweichungen O-C (observed minus calculated).

Um die Datenbasis zu vergrößern, wurden einige Nebenminima durch Verschieben um 0.5 * Periode einbezogen, insofern diese maximal +- 0.025 Tage vom Wert 0.5 * Periode abweichen.

Diese Daten sind mit dem Zusatz _N (wie Nebenminima) gekennzeichnet. Der Zusatz _P kennzeichnet aus Phasenkurven ermittelte Minima. Dazu wurden je nach Kadenz des Surveys aus einer geeigneten Anzahl von Aufnahmen eine Phasenkurve gebildet. Aus der Anfangsepoch T0 und der Phasenverschiebung P_ToM kann dann ein synthetisches Minimum HJD = T0 + E * P + P_ToM * P berechnet werden. Als Epoche E wurde dabei jeweils die Mitte der Aufnahmen gewählt.

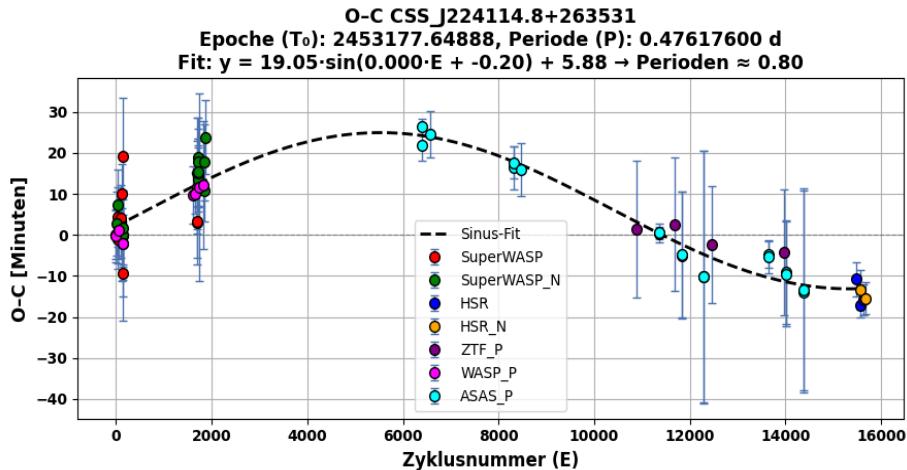


Abbildung 2: O-C-Diagramm CSS_J224114.8+263531 mit LiTE-Effekt

In einem solchen Diagramm werden dem Betrachter systematische Abweichungen und eventuelle periodische Schwankungen sofort vor Augen geführt: es offenbart sich eine deutliche (in erster Näherung sinusförmige) Schwankung der O-C Werte. Ein klares Indiz für einen Licht-Laufzeit-Effekt und damit einen entfernten lichtschwachen Begleiter des zentralen Doppelsternsystems.

Mit der angegebenen Periode berechnet man für alle zur Verfügung stehenden ToM aus Tabelle 1 die O-C-Werte („Observed minus Calculated“). Es ergibt sich, über der Epochenzahl (=Zyklusnummer) aufgetragen, die Abbildung 2.

Zur Berechnung der O - C geht man aus von der Gleichung:

$$(2) \quad C(\text{Min}) = M_0 + P_0 \times E.$$

M ist hier die Minimumszeit aus Formel (1), M₀ das Ausgangsminimum, P₀ die Periode zum Zeitpunkt M₀ und E die Epochenzahl, erhält man aus:

$$(3) \quad E = (M - M_0) / P_0.$$

Der indirekte Nachweis eines entfernten lichtschwachen Begleiters in einem

Doppelsternsystem durch einen Licht-Laufzeit-Effekt mittels sinusförmiger Schwankungen im O-C Diagramm ist eine seit Langem bekannte Methode [10].

3. Diskussion:

Ohne allzu tiefe Kenntnisse über EW-Bedeckungsveränderliche zu haben, waren wir zunächst ziemlich überrascht, bei einem mehr oder weniger zufällig ausgewählten EW-Stern einen Begleiter nachweisen zu können. Wir haben uns gefragt, ob es unter diesen Veränderlichen viele solcher Systeme gibt. In der Tat ist die Literatur dazu bereits erstaunlich umfangreich und die Abschätzungen über die Wahrscheinlichkeit solcher Begleiter wird zwischen 20% und 50% geschätzt. Schon 2006 schätzten Pribulla, T. & Rucinski [14], dass sogar >50 % der W-UMa-Sterne dritte Komponenten besitzen könnten. Aus WASP-Daten ermittelten Lohr et al. [15] hierfür einen Anteil von ~24 %. Insofern ist unser Befund also gar nicht so ungewöhnlich. Es ist vielleicht sogar so, dass Sterne ohne Begleiter selten sind! Allerdings lassen sich stellare Begleiter in kurzfristigen Survey-Zeiträumen selten genauer nachweisen (nur 2%) [siehe: 15]. Insbesondere masseärmere Begleiter erfordern oft lange Beobachtungszeiträume, weil die Effekte eher klein sind. Das bietet dann für Datamining und langfristig beobachtende Amateure gute Chancen.

Aus der Größe des LiTE-Effekts lässt sich die Untergrenze der Begleiter-Masse und seine Leuchtkraft zu $\approx 0,3$ Sonnenmassen abschätzen [13]. Hierbei wird die Bahnneigung i des EW-Systems mit $80\text{--}90^\circ$ und dessen Gesamtmasse mit 1,2 Sonnenmassen angenommen. Zu den Details einer solchen Abschätzung ist ein separater Artikel für einen folgenden Rundbrief geplant. Sterne mit Massen von 0.2-0.4 Sonnenmassen sind meist sog. späte M-Zwerge geringer Leuchtkraft (M3V-M5V Zwergssterne: mit absoluten Helligkeiten: 11.7-13.6 mag) [19].

Aufgrund der Lichtkurve muss die CSS-Klassifikation des Bedeckungsveränderlichen als EW-Typ evtl. infrage gestellt werden. Die eigenen Daten deuten eher auf einen EB-Stern hin. Wie bereits erwähnt ist der Veränderliche auch im ATLAS-Katalog [18] Typ CBF klassifiziert (s.o.). Damit wäre die Annahme der Gesamtmasse von 1,2 Sonnenmassen nicht mehr genau genug.

Kurz soll auch hier darauf eingegangen werden, welche weiteren Nachweismethoden für Begleiter es gäbe und auf die Frage, ob eine direkte Beobachtung möglich ist? Bisher sind nur wenige weitere Nachweismethoden bekannt: ähnlich wie beim Nachweis von Exoplaneten kommen hier u.a. auch spektroskopische Methoden infrage. Die Frage nach stellaren Mehrfachsystemen und deren Beschaffenheit ist von großer Bedeutung im Zusammenhang mit der Sternentwicklung. Insgesamt also ein sehr interessantes und aktuelles Thema, wie schon der Übersichtsartikel von Duchêne & Kraus aus 2013 zeigt [16]. Direkte Beobachtungen sind bereits 2007 von Rucinski et al. [17] veröffentlicht worden. Beobachtungen mit modernen Weltraumteleskopen wurden auch schon berichtet. Die Entfernung des EW-Systems ist aus der GAIA-Parallaxe bereits bekannt (ca. 1000 pc) [12]. Im vorliegenden Fall hätte der Begleiter (M-Zwergstern) dann eine scheinbare Helligkeit von nur ≈ 24 mag. Bei einem sehr geringem Winkelabstandabstand vom Hauptsystem (~ 11 mas) wäre eine direkte

Beobachtung somit auch zukünftig sicher schwierig. Da würden sich sogar die geplanten Riesenteleskope „die Zähne ausbeißen“. Auch das ELT (ESO) 39 Meter (max. Auflösung ~7 mas) und das TMT (Thirty Meter Telescope) 30 Meter (max. Auflösung ~9 mas), selbst wenn die adaptive Optik perfekt funktioniert. Hieran sieht man, wie nützlich jahrzehntelange Beobachtungsreihen (gerade auch in der Kombination von Datamining und eigenen Beobachtungen) sein können.

4. Ausblick:

Da ein kompletter Umlauf des Begleiters mit ungefähr 31 ± 5 Jahre abgeschätzt werden kann, sind weitere Beobachtungen des Systems sinnvoll. Mit einer Helligkeit von ca. 13.1-13.5 mag. (V) ist der Veränderliche CSS J224114.8+263531 im Feld des RRab-Variablen ET Peg auch mit kleineren Teleskopen leicht beobachtbar. Durch weitere Beobachtungen könnte auch eine Abgrenzung EW-/EB-Typ zuverlässiger vorgenommen werden. Weiterhin könnten die physikalischen Eigenschaften des Systems (z.B. die Gesamtmasse des Systems) durch Modellierung der Lichtkurve bestimmt werden, so dass auch die Masse des Begleiters genauer angeben werden könnte.

5. Danksagung:

Für diese Arbeit konnten im Jahr 2024 die SATINO-Teleskope [3] der „Stiftung Interaktive Astronomie und Astrophysik“ sowie die damit gewonnenen Daten genutzt werden. Wir danken der Stiftung für diese wertvolle Unterstützung.

6. Literatur/Links:

- [1] Drake, A. J. et al. (2009): "First Results from the Catalina Real-time Transient Survey" ApJ, 696, 870
- [2] A. J. Drake et al (2013) "The Catalina Surveys Periodic Variable Star Catalog" ApJS, 213, 9
- [3] SATINO-Projekt der "Stiftung Interaktive Astronomie und Astrophysik": <https://stiftung-astronomie.org/ueber-satino/>
- [4] Tycho-Tracker (universelle Software für Astrometrie und Photometrie): <https://www.tycho-tracker.com/>
- [5] Phoranso (Photometrie-Software): <https://www.cbabelgium.com/Phoranso/>
- [6] Peranso (Analyse der Daten, Perioden und Min./Max.-Zeiten): <https://www.cbabelgium.com/peranso/>
- [7] Butters, O.W. et al. (2010): "The SuperWASP Variable Star Catalog" A&A, 520, L10
- [8] Pollacco et al. (2006): "The WASP Project and the SuperWASP Cameras," PASP, 118, 850, 1407-1418
- [9] Bellm et al. (2019): "The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive," PASP, 131, 995, 018002 (mit IRSA-Service: <https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/ztf.html>)
- [10] Pojmanski, G. (2002): "The All Sky Automated Survey", Acta Astron., 52, 397

- [11] Wozniak, P. R. et al. (2004): "Northern Sky Variability Survey", AJ, 127, 2436
 [12] Gaia Collaboration (2022): "Gaia Data Release 3", A&A, 670, A45
 [13] Irwin, J. B. (1952): "The Determination of a Light-Time Orbit", ApJ, 116, 211
 [14] Pribulla, T. & Rucinski, S. M. (2006): "Contact Binaries with Additional Components" AJ, 131, 2986-3007
 Frei zugänglich beim arXiv-Preprint (submitted version): <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0601622>
 [15] Lohr, M.E. et al. (2015): "Orbital period changes and the higher-order multiplicity fraction amongst SuperWASP eclipsing binaries" A&A, 578, A136
 [16] Duchêne, G. & Kraus, A. (2013): "Stellar Multiplicity" Ann.Rev.Astron.Astrophys., 51, 1056
 [17] Rucinski, S.M. et al. (2007): "Contact binaries with additional components. III. A search using adaptive optics" AJ, 134, 2353-2365
 [18] Heinze et al. (2018): "A first catalog of variable stars measured by ATLAS" AJ, 156, 241H
 [19] Benedict et al. (2016): "The Mass-Luminosity Relation for Main Sequence M Dwarfs" AJ, 152, 141

Weiterhin wurde für diese Arbeit genutzt:

- die "International Variable Star Index (VSX) database", AAVSO, Cambridge, Massachusetts, USA:
<https://vsx.aavso.org/index.php?view=vsx.home>
- SIMBAD: Wenger, M. et al. (2000): SIMBAD Astronomical Database, CDS, Strasbourg, France:
<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- VizieR: Ochsenbein, F., Bauer, P., Marcout, J. (2000), The VizieR database of astronomical catalogs, A&AS, 143, 23: <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>
- das NASA-ADS: Accomazzi, A. et al., (2023), The SAO/NASA Astrophysics Data System, The Astrophysical Journal, 944, 2: <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

Kontaktadressen:

D. Husar (HSR) / Hamburg, husar.d@gmx.de

Th. Rudolph (RDP) / Dresden, thomas@fam-rudolph.eu