

Polaris - Radialgeschwindigkeitsmessungen von 2005 bis 2020

Roland Bücke, Hamburg

1. Einleitung

Polaris ist ein Doppelstern mit einer optisch sichtbaren Komponente (Polaris B) in 18.4“ Entfernung vom Hauptstern (Polaris A). Dieser ist selbst ein enger Doppelstern, so dass wir es insgesamt mit einem Dreifachsternsystem zu tun haben. Die Komponenten des engen Systems werden mit Polaris Aa und Ab bezeichnet. Polaris Ab lässt sich aufgrund der viel geringeren scheinbaren Helligkeit spektroskopisch nicht nachweisen, wurde aber 2006 mit dem Hubble-Weltraumteleskop optisch aufgelöst. Der Hauptstern des Dreifachsystems, die hellste Komponente Polaris Aa, ist des Weiteren ein Pulsationsveränderlicher der Klasse der Cepheiden.

Für uns Amateurbeobachter stellt sich nun die interessante Frage, welche Eigenschaften dieses komplexen Mehrfachsternsystems im sichtbaren Spektralbereich zeitlich variabel und beobachtbar, wie groß diese Änderungen sind und in welchen zeitlichen Maßstäben die Variationen ablaufen?

- als Cepheide zeigt der ca. 2^m helle Hauptstern Polaris Aa Helligkeitsänderungen mit einer Periodendauer von 3.97 Tagen. Allerdings beträgt die Amplitude dieser Periodizität gegenwärtig nur etwa 0.025 mag. Diese sehr kleine Amplitude wächst seit dem Durchlaufen eines Minimums in den 1990-er Jahren wieder langsam an, so dass sich die Beobachtungsbedingungen in den kommenden Jahren verbessern dürften.
- Das Pulsieren des Cepheiden lässt sich nicht nur photometrisch, sondern auch spektroskopisch durch Radialgeschwindigkeitsmessungen nachweisen. Diese Radialgeschwindigkeitsänderungen sind aber ebenso wie die Helligkeitsänderungen nur sehr klein. Gegenwärtig beträgt die Peak-to-Peak Amplitude (2K) etwa 3,4 km/s.
- Der spektroskopische Doppelstern verursacht ebenso wie das Pulsieren des Cepheiden Radialgeschwindigkeitsänderungen. Deren Periodendauer beträgt gemäß der Umlaufdauer allerdings 30 Jahre! Nur durch Langzeitbeobachtungen lassen sich demzufolge verwertbare Ergebnisse zur Berechnung der Bahnparameter erzielen. Ein kleiner Trost: Die Umlaufbahn der Komponente Ab ist stark elliptisch geformt. Die letzte Periastron-Passage führte deshalb zu einem Anstieg der Radialgeschwindigkeit von -19 km/s auf -11 km/s ab 2014 innerhalb der nachfolgenden 3,5 Jahre. Diese Radialgeschwindigkeitsänderung von ca. 8 km/s ist mit den heutigen instrumentellen Möglichkeiten auch für Amateure nahezu problemlos beobachtbar.

Da die Oszillation des Cepheiden sowohl spektroskopisch als auch photometrisch nachweisbar ist, besteht die interessante Möglichkeit von simultanen Beobachtungen durch Spektroskopiker und Veränderlichenbeobachter. Des Weiteren sei hervorgehoben, dass die exponierte Position von Polaris weit über dem Horizont am Himmelspol, Beobachtungen ganzjährig unter guten Bedingungen erlaubt. Die Radialgeschwindigkeitsamplitude (2K) der 3,97-Tage-Periode hat sich in den vergangenen Jahrzehnten fortwährend geändert. Diese ist von 5 – 6 km/s in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf weniger als 2 km/s in den 1990er Jahren geschrumpft. In den 1990er Jahren registrierte man ein Verharren bei ca. 1.5 km/s und danach ein erneutes Anwachsen auf ca. 3 - 3,5 km/s bis 2011. Seit 2011 zeichnet sich eine konstante 2K-Amplitude in dieser Größe ab. Literaturwerte hierfür finden sich bei Anderson [1] und Usenko et al. [2] für den Zeitraum 2011 bis 2018 mit durchschnittlich 3,44 km/s und von 2015 bis 2020 mit durchschnittlich 3,11 km/s. Dies deckt sich mit meinen eigenen Beobachtungen, wie im Abschnitt Auswertung noch detaillierter ausgeführt wird.

2. Beobachtung und Datenreduktion

Der Datensatz, der den Zeitraum vom 21.04.2005 bis zum 19.12.2020 abdeckt, umfasst insgesamt 244 Beobachtungen. Die Spektren wurden bis August 2018 mit einem 8"-Dobson-Teleskop und seitdem mit einem 18"-Dobson-Teleskop aufgenommen. Die Ausführung der Teleskopmontierungen in Dobson-Bauweise erfordert die Ankopplung des Spektrographen mit einem Lichtwellenleiter, da dieser aufgrund seines Gewichts nicht direkt an das Teleskop montiert werden kann. Die Nachführung der Teleskope erfolgt automatisch lichtelektrisch, indem das Positionssignal über ein Faserbündel an die Steuerelektronik geleitet wird (Abb. 1).

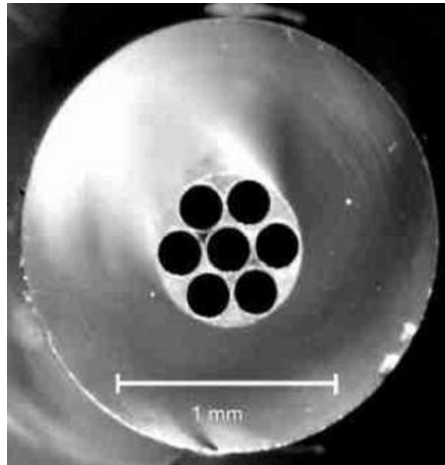


Abb. 1: Faserbündel zur automatischen Nachführung der Teleskope - die zentrale Faser leitet das Sternlicht zum Spektrographen, die äußeren 6 Fasern dienen der Nachführung

Der Spektrograph hat eine Auflösung von $R=3500$. Die Belichtungszeiten der Einzelaufnahmen haben sich mit der stärkeren Optik um den Faktor 4 bis 5 verkürzt und betragen jetzt ca. 40 Sekunden. In der Regel nehme ich 5 bis 8 Spektren auf, die jeweils von einem Kalibrierspektrum (Ne-Spektrum) vor und nach der Aufnahme des Spektrums flankiert werden. Die hierdurch stark verkürzte Integrationszeit gegenüber einem Summenspektrum über den gesamten Beobachtungszeitraum ermöglicht eine wesentlich höhere Genauigkeit der RV-Messungen, da zeitliche Instabilitäten, wie z. B. durch Temperaturschwankungen, stark reduziert werden. Die Streuung (Standardabweichung) der Wiederholungsaufnahmen ist ausnahmslos kleiner $\pm 0,18$ km/s und beträgt durchschnittlich $\pm 0,08$ km/s.

Die Radialgeschwindigkeit (nachfolgend mit "RV" abgekürzt) wurde an den normierten und kalibrierten Spektren durch Kreuzkorrelation im Wellenlängenbereich von 6050 - 6700 Å ermittelt. Ein Spektrum von Polaris vom 21.04.2005 diente hierzu als Template. Die Kalibrierung erfolgte an 17 Neonlinien mit einem Polynom 7. Grades.

3. Auswertung

3.1 Pulsation des Cepheiden

In den nächsten Diagrammen wird die RV immer als Geschwindigkeitsdifferenz zum verwendeten Template und nicht die tatsächlichen RV von Polaris in Bezug auf unser Sonnensystem angegeben. Sie wird deshalb als relative RV bezeichnet.

Die in Abb. 2 dargestellten Messwerte vom 21.04.2005 bis zum 19.12.2020 umfassen ca. einen halben Umlauf der Doppelsternkomponente incl. einer Periastron-Passage, was die Berechnung der Bahnparameter ermöglichte. Deutlich erkennbar ist die größere Streuung der Messwerte ab 2011 gegenüber den Messwerten vor 2009. Dies ist ein erster Hinweis auf zeitliche Änderungen der Amplitude der Pulsation des Cepheiden, wie aus der nachfolgenden Analyse detaillierter hervorgeht.

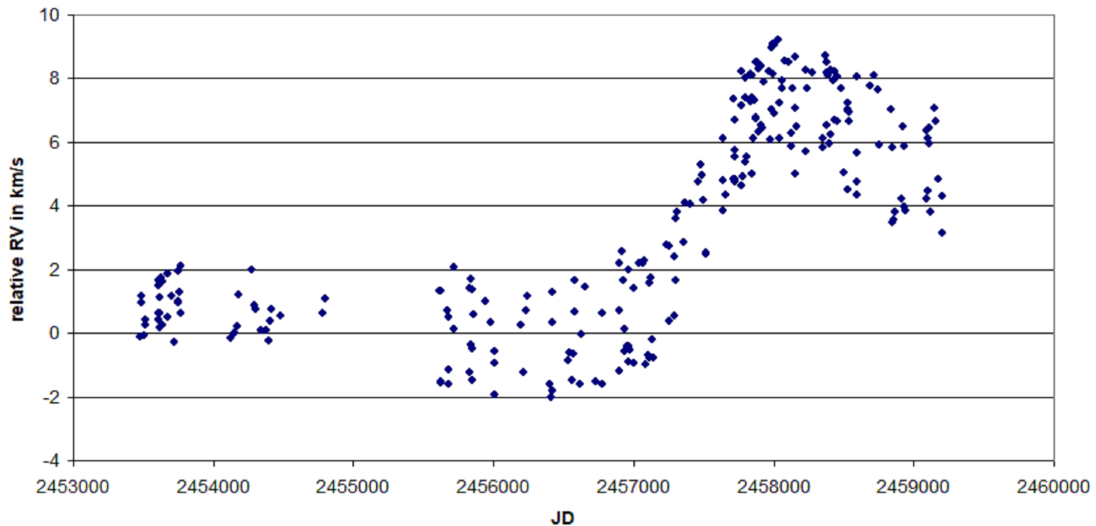


Abb. 2: Originalmesswerte

Zur Analyse der 3,97-Tage-Periode wurde aus den Originalmesswerten die RV-Kurve des Doppelsterns mit den bekannten Bahnparametern eliminiert (Abb. 3) und danach jahresweise ein Sinusfit durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst und in Abb. 4 gemeinsam mit verfügbaren Literaturwerten grafisch dargestellt. Aus der Unsicherheit der Messpunkte lässt sich eindrucksvoll der Genauigkeitsgewinn durch die Einführung der CCD-Technik in den 1990er Jahren gegenüber den fotografisch aufgenommenen Spektren der früheren Jahre ableiten. Die Grafik zeigt den Anstieg der Amplitude bis 2011. Danach bleibt sie im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Leider lässt sich durch die Beobachtungslücke zwischen 2008 und 2011 kein genauere Verlauf der Amplitudenänderung und des Übergangs in den konstanten Zustand rekonstruieren. Dies ist umso bedauerlicher, da ausgerechnet für den gleichen Zeitraum keine Literaturwerte zur Verfügung stehen. In [6] veröffentlichten Lee et al. für 2005, 2006 und 2007 Amplitudenwerte von 2,21 km/s, 2,08 km/s und 2,41 km/s. Die gute Übereinstimmung mit den neuesten Literaturwerten in [1] und [2] kann als Maß für die Zuverlässigkeit der eigenen Ergebnisse zwischen 2011 und 2020 angenommen werden.

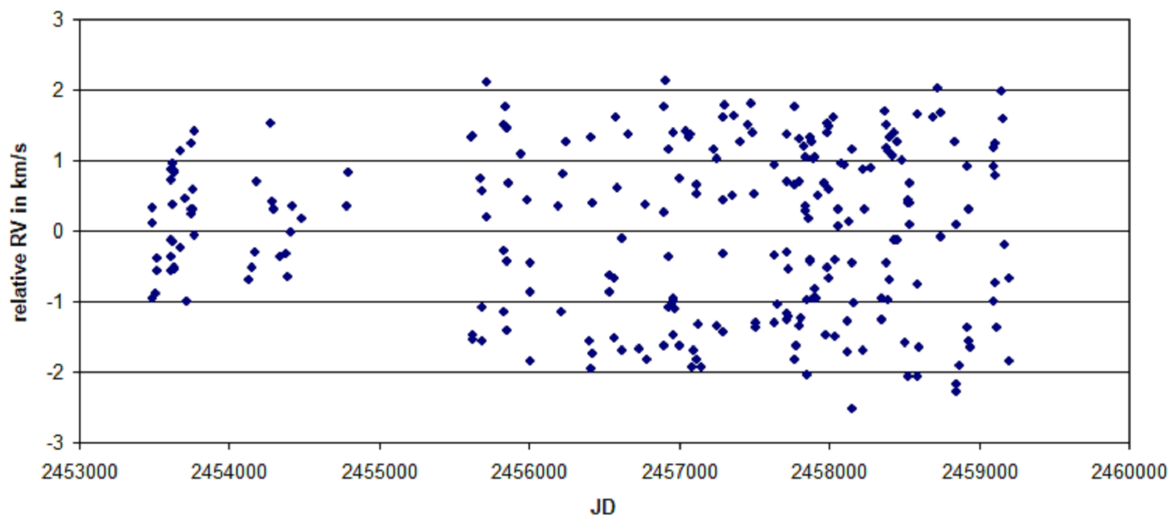


Abb. 3: Messwerte ohne Bahnkurve des Doppelsterns

Tabelle 1: zeitliche Entwicklung der Amplitude des Cepheiden:

Jahr	2K-Amplitude km/s	Unsicherheit \pm km/s
2005	1,70	0,07
2006	2,18	0,09
2007	2,04	0,11
2011	3,30	0,07
2012	2,98	0,07
2013	3,34	0,08
2014	3,52	0,06
2015	3,42	0,05
2016	3,18	0,07
2017	3,26	0,05
2018	3,28	0,07
2019	3,45	0,07
2020	3,32	0,07

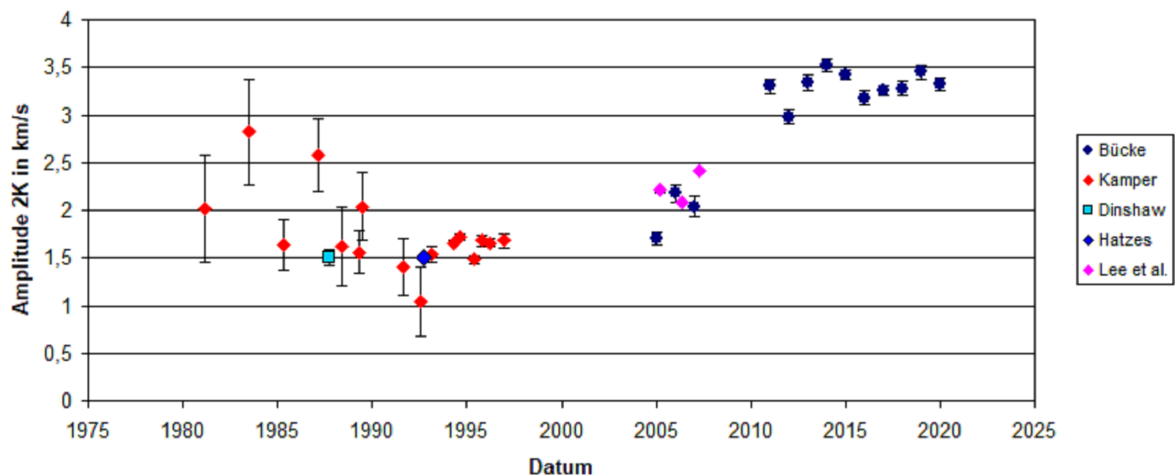


Abb. 4: zeitlicher Verlauf der 2K-Amplitude der 3,97-Tage-Schwingung - eigene Messungen und Literaturwerte [3], [4], [5], [6]

Da innerhalb der Zeitabschnitte von 2005 - 2008 und 2011 - 2020 jeweils von einem konstanten Schwingungsverhalten ausgegangen werden kann, wurden für diese getrennt Periodenanalysen mit den Programmen SpecTSA und Period04 vorgenommen, um sowohl die Periodendauer als auch die Amplitude genauer bestimmen zu können. Mit beiden Programmen erhält man exakt die gleichen Ergebnisse (Tab. 2). Die Phasendiagramme (Abb. 5) für beide Zeitabschnitte verdeutlichen die Größe des schnellen Amplitudenanstiegs innerhalb von nur 3 Jahren.

Tab. 2: Parameter der 3,97-Tage-Periode:

Parameter	21.04.2005 - 25.11.2008	21.02.2011 - 19.12.2020
Periode in Tagen:	$3,9722 \pm 0,0003$	$3,97206 \pm 0,00002$
2K-Amplitude in km/s:	$1,78 \pm 0,06$ km/s	$3,28 \pm 0,02$ km/s
RMS für Sinusfit in km/s:	0,25 km/s	0,22 km/s

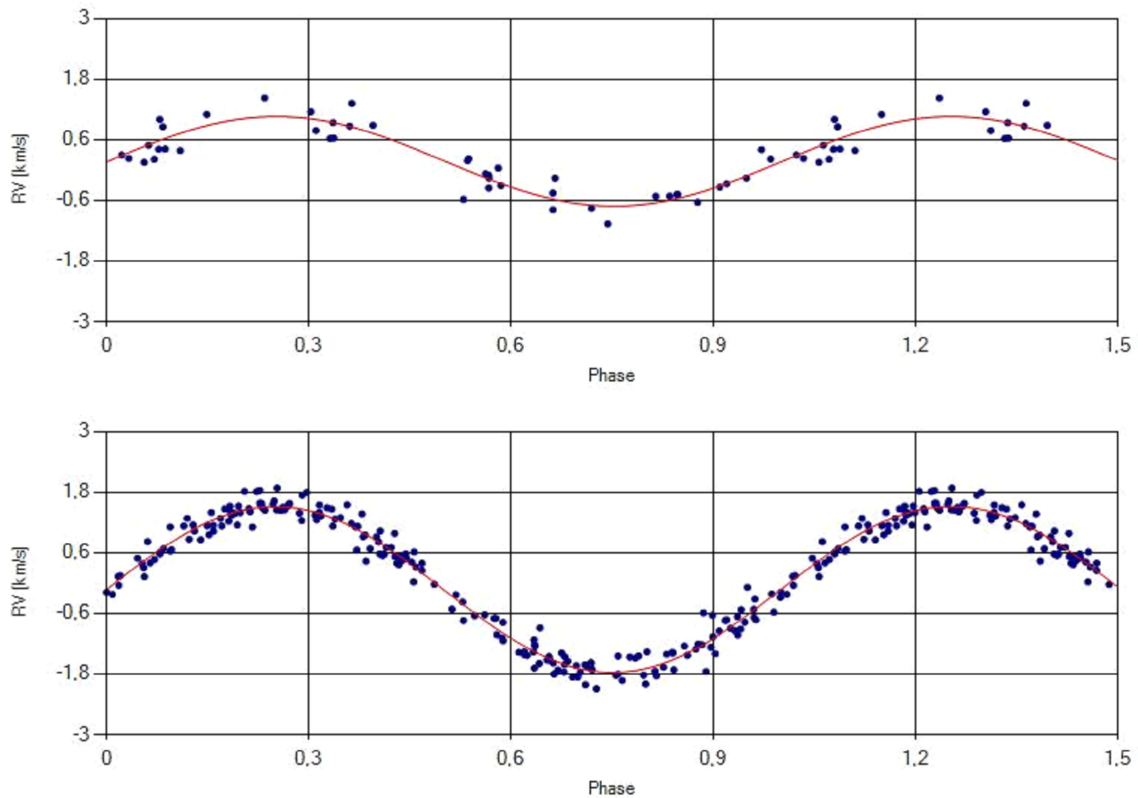


Abb. 5: Sinusfit an die Messwerte (ohne Bahnkurve des Doppelsterns), oben für den Zeitraum bis 2008, unten für den Zeitraum ab 2011

3.2 Bestimmung der Bahnparameter des Doppelsterns

Da die Beobachtungsspanne von 15 Jahren nur einen halben Umlauf des Doppelsternsystems Polaris Aa und Ab erfasst, wurden für die Bestimmung der Bahnparameter die von Kamper in [4] veröffentlichten Radialgeschwindigkeitswerte in die Auswertung einbezogen. Da der Datensatz von Kamper die absoluten Radialgeschwindigkeiten enthält, wurden die eigenen Messwerte zur Anpassung an diesen um $-19,75 \text{ km/s}$ verschoben (Abb.6). Die Daten decken zwei Periastron-Passagen ab und ermöglichen somit eine zuverlässige Bestimmung der Umlaufzeit. Mit den Programmen SpecTSA und SpecRaVE konnten die weiteren Bahnparameter ermittelt werden (Tab. 3). Außerdem sind in dieser Tabelle zum Vergleich die Bahnparameter aus den zwei neuesten Veröffentlichungen angeführt.

Tab. 3: Bahnparameter des Doppelsterns:

Parameter	Anderson 2019	Usenko et al. 2020	eigene Ergebnisse
P in Jahre:	$29,32 \pm 0,11$	$29,25 \pm 0,03$	$29,31 \pm 0,07$
A in km/s:	$3,768 \pm 0,073$	$3,93 \pm 0,12$	$3,74 \pm 0,06$
ϵ :	$0,62 \pm 0,008$	$0,633 \pm 0,044$	$0,574 \pm 0,010$
ω in Grad:	$307,2 \pm 2,5$	$302,5 \pm 2,7$	$300,7 \pm 3,0$
T_0 in JD:	$2016,91 \pm 0,10$	$1987,22 \pm 0,10$	$2016,77 \pm 0,10$
γ in km/s:	$-15,387 \pm 0,073$	$-16,61 \pm 0,12$	$-17,1 \pm 0,4$
$a_1 \sin i$ in AU:	$2,910 \pm 0,062$	-	3,0

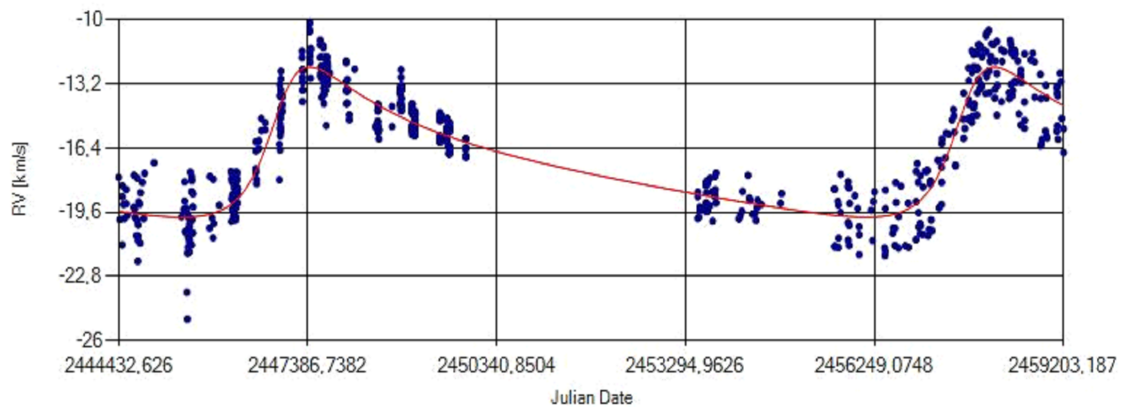


Abb. 6: Doppelstern, Bahnkurve mit den Bahnparametern aus Tabelle 3 an den Messwerten aus der Literatur [4] und den eigenen Messwerten

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Obwohl Polaris als Cepheide nur mit einer kleinen Amplitude von wenigen km/s schwingt, lassen sich durch Messungen über einen langen Zeitraum zuverlässige Ergebnisse mit einer Genauigkeit erzielen, die auch den Nachweis kleinerer zeitlicher Änderungen erlaubt. So vergrößerte sich die Peak-to-Peak Amplitude von 1,8 km/s in den Jahren 2005 bis 2007 auf fast den doppelten Wert von 3,3 km/s innerhalb der darauf folgenden 4 Jahre, um dann seit 2011 konstant zu bleiben. Die Erkenntnis, dass signifikante Änderungen im Schwingungsverhalten in so kurzen Zeitabschnitten ablaufen können, sind eine starke Motivation für eine kontinuierliche Fortsetzung der Beobachtungen.

Die Umlaufzeit des Doppelsternsystems Polaris Aa und Ab beträgt ca. 30 Jahre. Eine genaue Berechnung der Bahnparameter erforderte daher die Einbeziehung früherer Literaturwerte aus [4], so dass der gesamte Datensatz zwei Periastron-Passagen abdeckt. Ein Vergleich mit den neuesten Veröffentlichungen bestätigt die Ergebnisse der eigenen Messungen (siehe hierzu Tab. 3).

Referenzen

[1]	Anderson, R. I.: Probing Polaris' puzzling radial velocity signals, A & A 623, A146 (2019)
[2]	Usenko, I. A. et al.: Spectroscopic investigations of the Polaris (α UMi) system, Odessa Astronomical Publications, vol. 33 (2020)
[3]	Dinshaw, N., Matthews, J. M., Walker, G. A. H., Hill, G. M.: The radial-velocity variations of Polaris: A cepheid leaving the instability strip?, The Astronomical Journal, Vol. 98, No. 6 (1989)
[4]	Kamper, K.: Polaris today, J. Roy. Astron. Soc. Can., Vol. 90, No. 3 (1996)
[5]	Hatzes, A. P., Cochran, W. D.: The radial velocity and spectral line bisector variability of Polaris, The Astronomical Journal, 120:979E989 (2000)
[6]	Lee, B.-C. et al.: Precise radial velocities of Polaris: Detection of amplitude growth, The Astronomical Journal, 135:2240–2244 (2008)