

Auf Hubble's Spuren: Eine anschauliche fotometrische Analyse des ersten extragalaktischen Veränderlichen M31-V1

Markus Kohl

Im Jahr 1923 entdeckte der amerikanische Astronom Edwin Hubble durch Vergleich der berühmten fotografischen Platten H335H und H331H des 100-Zoll Hooker-Teleskops am Mount Wilson den ersten veränderlichen Stern im Andromedanebel. Dieser wurde als Hubble's V1 oder M31-V1 zu dem Stern, der "das Universum veränderte". Schwerlich würde zwar durch einen einzelnen Stern das Weltall an sich verändert, in jedem Fall aber erschütterte seine Entdeckung das Verständnis der Astronomen über Größe und Ausdehnung unserer Galaxie. Durch Bestimmung seiner Entfernung konnte Hubble erstmals nachweisen, dass es sich bei M 31 um eine eigene "Sterneninsel" weit außerhalb unserer Milchstraße und damit um ein eigenes Galaxiensystem handelt.



Abb. 1: Position des Veränderlichen M31-V1 [6,7] (J2000.0): $00^{\text{h}} 41^{\text{m}} 27.30^{\text{s}}, +41^{\circ} 10' 10.4''$), Bildautor Markus Kohl

Der Stern rückte in der Folge mehrfach in das Interesse der Astronomen [1,7]. 1965 brachte Henrietta Swope bis dahin unveröffentlichte fotometrische Daten von Walter Baade ans Licht. Dieser hatte den Stern 1950 und 1951 mit dem 200-Zoll-Teleskop des Mount Palomar-Observatoriums beobachtet. Etwa 60 Jahre später, zwischen Juli und Dezember 2010, führten 10 Amateurastronomen um den Direktor der AAVSO (American Association of Variable Star Observers), Arne Henden, 214 Beobachtungen

des V1 durch und ermittelten daraus 4 Pulsationszyklen samt Periode aus seiner Helligkeitskurve. Zudem wurde der Stern im Dezember 2010 und Januar 2011 standesgemäß durch das Hubble-Space-Teleskop aufgenommen.

Im Rahmen einer "Jugend-forscht-Arbeit" erprobten zwei meiner Schüler 2017/18 an eigenen Digitalaufnahmen ein anschauliches fotometrisches Verfahren und konnten damit die Lichtkurven zweier Supernova-Explosionen erstellen und qualitativ vergleichen. Um die gemeinsam entwickelte Vorgehensweise parallel zur Schülerarbeit selbst zu testen, machte ich mich kurz vor Mitte des Jahres 2017, also fast 100 Jahre nach Hubble, an das ambitionierte Ziel, dessen Messungen nachzuvollziehen. Mit rein amateurastronomischen Mitteln sollte eine Helligkeitskurve von M31-V1 entstehen, aus der auch seine Pulsationsperiode und die absolute Helligkeit abgeschätzt werden können.



Abb. 2: M31-V1 in der Andromedagalaxie, Bildautor Markus Kohl

Meine fotografischen Beobachtungen erstreckten sich über einen Zeitraum von knapp eineinhalb Jahren, d.h. von Mitte 2017 bis gegen Ende 2018. Aufnahmegerät war i.d.R. ein apochromatischer 6-Zoll-Refraktor, kombiniert mit einer modifizierten DSLR in meiner Gartensternwarte in Hauzenberg (Niederbayern). Das Teleskop ist Eigentum der Sternwarte am Gymnasium Untergriesbach (www.swgu.de). Weiterhin konnte ich ergänzend einige Aufnahmen befreundeter Hobby-Astronomen heranziehen. Dabei erwies sich das in diesem Artikel gezeigte Verfahren unabhängig vom Aufnahmegerät und der verwendeten Kamera als gut funktionsfähig. So kamen insgesamt etwa 40 Beobachtungsabende (davon 35 eigene Aufnahmen) zur Auswertung.

Zu meinem Glück hat ein Sternfreund im September 2012 eher zufällig ein Maximum auf einer Aufnahme abgebildet, anhand dessen ich die Zeitpunkte der Maxima der Jahre 2017 und 2018 in etwa vorherbestimmen konnte. In der Literatur und in den zugänglichen online-Quellen findet man dazu relativ wenig verlässliche Informationen. Abbildung 2 (eigene Aufnahme) zeigt die Lage des Sterns genauer.

Beschreibung des Verfahrens

Die scheinbare Helligkeit des veränderlichen M31-V1 wurde anhand der bekannten Helligkeit zweier Referenzsterne direkt in der Umgebung ermittelt. Der folgende Vergleich zeigt den Unterschied an drei Ausschnittvergrößerungen in Graustufen (Abb. 3a-c). Man erkennt ein markantes Dreieck mit V1 links oben, der Referenzstern rechts wird im online-Himmelsatlas "Aladin"[6] mit 18,4 mag als m_{Ref1} , der hellere links (DMM2009) J004125.80+411018.9 mit 17,9 mag als m_{Ref2} verzeichnet.

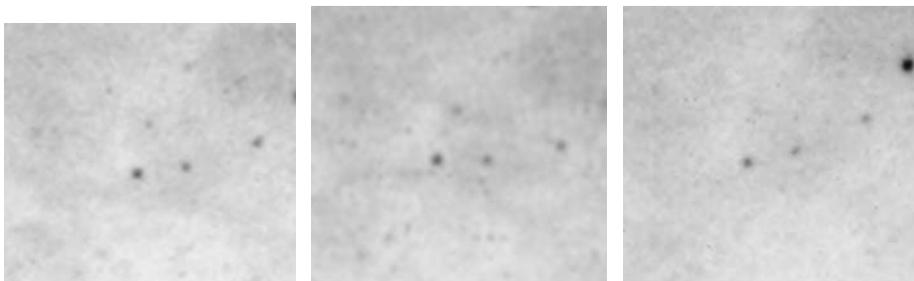


Abb. 3a-c: Abb. 3a: 22.09.2017: 18,9 mag

Abb. 3b: 15.10.2017: 18,2 mag +/-0,3 - annähernd im Maximum

Abb. 3c: 06.01.2018: 19,2 mag +/- 0,1 - schlechtes Seeing

Mithilfe der Funktion "Pixellinie als Diagramm anzeigen" (Abb. 4) im astronomischen Tool "Fitswork" können aus dem Graustufenbild die Sättigungswerte ermittelt werden.

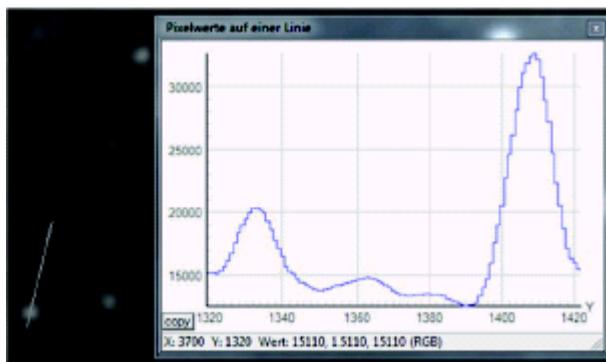


Abb. 4: "Pixellinie als Diagramm" in Fitswork

Entlang einer Linie, die der Benutzer frei positionieren kann, liest die Software die Sättigungen aus und stellt sie pixelgenau als Messkurve dar. Die Linie ist im

ansonsten unbearbeiteten Bild aus praktischen Gründen so zu legen, dass zusammen mit dem Messobjekt V1 immer einer der Referenzsterne direkt einbezogen wird. Das resultierende Diagramm liefert zwei Indikatoren für die Helligkeit:

- a) die Pixelsättigung h im Maximum des Peaks für V1 (links) und Referenzstern (rechts) als Ordinate
- b) den Durchmesser d des Bereichs der angeregten Pixel über einem jeweils individuell festgelegten "Nullniveau" der Pixelsättigung (oberhalb des thermischen Rauschens des Sensors oder der Hintergrundaufhellung).

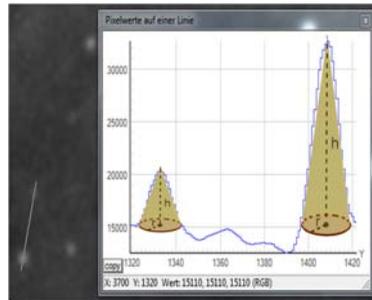
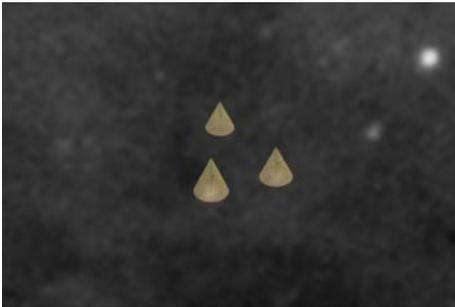


Abb. 5a (links): Modelldarstellung der Kegelnäherung

Abb. 5b (rechts): Kegelnäherung der Messkurve

Da für die parallel laufende Arbeit der Realschüler auf eine Volumenintegration an der Kurve verzichtet werden sollte, wurde mit diesen beiden Werten für jeden der drei Sterne ein fiktives Kegelvolumen bestimmt (Abb. 5a, links), dessen Radius r der halbe angeregte Durchmesser ($d/2$) ist und dessen Höhe dem maximalen Sättigungswert des Sternscheibchens entspricht (veranschaulicht in Abb. 5b rechts).

Dieses Kegelvolumen dient somit als Maß S für die eintreffenden Strahlungsströme und als Vergleichsgröße zur Messung. Gemäß der standardisierten Helligkeitsbestimmung, die auf Norman Robert Pogson (1829-1891) zurückgeht, gilt für den Unterschied der scheinbaren Helligkeiten m_1 und m_2 zweier Sterne in Abhängigkeit vom Maß S_1 und S_2 der empfangenen Strahlungsströme:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log\left(\frac{S_1}{S_2}\right)$$

Demnach entspricht der Unterschied von einer Größenklasse bekanntlich etwa dem Faktor 2,5. Setzt man für S_1 und S_2 jeweils das Kegelvolumen (s.o.) ein, lassen sich der Faktor $\frac{1}{3}$ und die Kreiszahl π kürzen. Für die scheinbare Helligkeit des veränderlichen Sterns V1 ergibt sich dann folgende Formel:

$$m_{V1} = -2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left(\frac{d_{V1}}{2}\right)^2 \cdot h_{V1}}{\left(\frac{d_{Ref}}{2}\right)^2 \cdot h_{Ref}} \right) + m_{Ref}$$

Gleichzeitig wird in der Tabellenkalkulation (Abb. 6) von der Helligkeit des ersten Referenzsterns mit dieser Formel auf die des zweiten geschlossen und umgekehrt (Referenzstern-Verifizierung zum Test der Genauigkeit für den jeweiligen Tag).

M31-V1	Eingabe: Pulsationsperiode P	31,4	Absolute Helligkeit	5,6
			$M = -2,81 \cdot \log(P/\text{Tage}) - 1,43.$	
Sättigungswert max Pixel	Eingaben:	m Refsterne		
Referenzstern1	26352	18,4	M31-V1	
Referenzstern2	32562	17,9	20000	
Nullniveau der Pixelsättigung (Festlegung!)		15000		
Länge der Basislinie auf Nullniveau				
Referenzstern1	22		M31-V1	
Referenzstern2	26		20	
Referenzsternverifizierung Ref1 -> Ref2	Sollwert	Abweichung		
17,8	17,9	-0,1		
Referenzsternverifizierung Ref2 -> Ref1	Sollwert	Abweichung		
18,5	18,4	0,1		
Magnitude V1 vgl. 1. Ref-Stern	Gemittelte Magnitude V1			
18,9	19,0 mag			
Magnitude V1 vgl. 2. Ref-Stern				
19,0				

Abb. 6: Auswertung in der Tabellenkalkulation

Durch "Stacken" mehrerer Bilder erhöht sich hierbei die Präzision deutlich, indem Rauschpixel gemittelt werden und die Kurve glatter und genauer definiert erscheint. Der Vergleich mit Aufnahmen anderer Astronomen unter Verwendung unterschiedlichster Kameras/Aufnahmeinstrumente brachte meist vergleichsweise geringe Abweichungen. Deshalb wage ich zu behaupten, dass dieses Verfahren vom Gerät unabhängig ist. Dagegen wird es sehr wohl von Seeing-Bedingungen beeinflusst. Einige Aufnahmen nahe der Maxima waren 2018 zudem noch bei hellem Mondlicht nötig. Bei einem Stern der 19. Größenklasse ein schwieriges Unterfangen! Als maximale Abweichung bei der Verifizierung ergab sich bei schlechten Messbedingungen +/- 0,7 mag, weshalb einige Messdaten durchaus unter Vorbehalt zu verwenden sind bzw. verworfen wurden. Den Unterschied zwischen der Helligkeit im Maximum und des "normalen" Aussehens von V1 konnte man bei guten Bedingungen mit etwas Übung dennoch am Bild visuell erkennen (vgl. Abb. 3a-c).

Anhand der etwa 40 Beobachtungstermine 2017 und 2018 (mit etwa 60-80 h Gesamtbelichtungszeit incl. Dunkelfeld-Subtraktion und Offset-Kalibrierungsbildern) ergibt sich aus den brauchbaren Werten (Fehlmessungen ausgesondert) die Tabelle in Abbildung 7.

Graphisch erhält man statt einer Helligkeitskurve zunächst eher eine Sammlung verstreuter "Messpunkte". In Abbildung 8 (weiter unten) können insgesamt sechs Maxima erahnt werden.

Urheber des Bildes	Datum	Magnitude phot aus SW	Fehler + -	Obergrenze	Untergrenze	
Rainer Klemm	29.10.2010	18,5	0,2	18,7	18,3	nicht sicher, mögl. Max. nahe
Florian Steimer	19.10.2012	18,1	0,2	18,3	17,9	nahe Max.
Josef Büchsenmeister	25.08.2016	18,9	0,2	19,1	18,7	nahe Max.?
Markus Kohl	28.08.2017	19,1	0,2	19,3	18,9	max. ber. am 2017 08 14.3
Markus Kohl	30.08.2017	19,1	0,2	19,3	18,9	
Markus Kohl	18.09.2017	19,0	0	19	19	max ber. am 2017 09 14.7
Markus Kohl	22.09.2017	19,0	0,1	19,1	18,9	
Markus Kohl	23.09.2017	19,1	0,1	19,2	19	
Markus Kohl	28.09.2017	19,2	0,4	19,6	18,8	
Markus Kohl	30.09.2017	19,0	0	19	19	
Markus Kohl	11.10.2017	19,0	0,1	19,1	18,9	
Kohl, Steimer	13.10.2017	19,0	0,5	19,5	18,5	zwei Aufnahmen, gleicher Wert
Markus Kohl	15.10.2017	18,2	0,1	18,3	18,1	max ber. am 2017 10 16.1
Kohl, Steimer, Klemm	16.10.2017	18,7	0,4	19,1	18,3	drei Aufnahmen, Abweichungen
Markus Kohl	19.10.2017	18,8	0,2	19	18,6	
Markus Kohl	14.11.2017	18,7	0,6	19,3	18,1	
Walter Primik	15.11.2017	18,5	0	18,5	18,5	max ber. am 2017 11 16.5
Markus Kohl	22.11.2017	18,9	0,1	19	18,8	
Markus Kohl	23.11.2017	19,2	0,1	19,3	19,1	
Markus Kohl	07.12.2017	19,2	0,2	19,4	19	
Markus Kohl	13.12.2017	18,7	0,3	19	18,4	max ber. am 2017 12 17.9
Markus Kohl	18.12.2017	18,7	0	18,7	18,7	
Markus Kohl	26.12.2017	18,9	0	18,9	18,9	
Markus Kohl	06.01.2018	19,1	0,1	19,2	19	max ber. am 18.01.2018
Markus Kohl	11.09.2018	19,0	0,4	19,4	18,6	
Florian Steimer	27.09.2018	18,0	0	18,0	18,0	max ber. am 2018 09 26.5
Markus Kohl	28.09.2018	18,6	0	18,6	18,6	schlechte Identifizierung
Florian Steimer	29.09.2018	18,6	0	18,6	18,6	wenig Kontrast
Markus Kohl	04.10.2018	19,1	0,4	19,5	18,7	diffus
Markus Kohl	05.10.2018	19,2	0,7	19,9	18,5	unklar zu messen
Markus Kohl	11.10.2018	19,1	0,4	19,5	18,7	Esprit 80
Markus Kohl	26.10.2018	18,4	1	19,4	17,4	max ber. am 2018 10 27.9
Markus Kohl	30.10.2018	18,6	0,3	18,9	18,3	
Markus Kohl	31.10.2018	18,9	0,2	19,1	18,7	
Markus Kohl	01.11.2018	19,2	0,1	19,3	19,1	
Markus Kohl	05.11.2018	19,3	0,1	19,4	19,2	
Markus Kohl	06.11.2018	19,3	0,4	19,7	18,9	kaum registriert
Markus Kohl	08.11.2018	19,2	0	19,2	19,2	sicher: 19 Aufn. recht scharf!
Markus Kohl	28.11.2018	18,4	0,1	18,5	18,3	max berechnet 2018 11 28.3
Markus Kohl	29.11.2018	19,2	0,1	19,3	19,1	unsicher

Abb. 7: Tabelle der Messwerte

Gemäß der allgemein anerkannten Annahme, dass die Lichtkurve eines Pulsationsveränderlichen einen immer analogen periodischen Verlauf aufweist, sei ein "Kunstgriff" gestattet: Die Ergebnisse aus 2017 und 2018 wurden von einem relativ

sicher definierten Maximum aus passgenau ohne weitere Skalierung überlagert. Daraus lassen sich die Helligkeitsmaxima (rote Linien) wie in Abbildung 9 graphisch interpolieren.



Abb. 8: Die Messungen aus 2017 und 2018 graphisch dargestellt

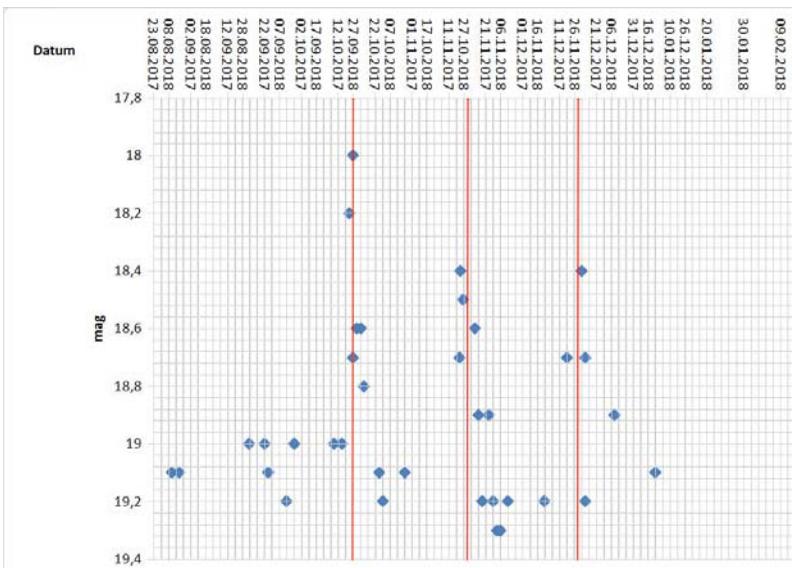


Abb. 9: Überlagerung von 2018 und 2019 mit graphischer Interpolation der Maxima

Die Überlagerung mit der Lichtkurve von Delta Cephei [2] (Abbildung 10) gibt einen weiteren Anhaltspunkt für die Tatsache, dass es sich um einen Cepheiden handeln dürfte. Im Vergleich zum "Prototypen" dieser Art veränderlicher Sterne steigt allerdings die Helligkeit zur Spitze des Maximums recht steil und fällt ebenso schnell wieder ab (wie auch von der AAVSO-Gruppe 2010 dokumentiert). Daher musste ich anhand des

Literaturwertes der Periode vorherberechnen, wenn ein Maximum zu beobachten sein würde, um es auch zu treffen. Das Wetter spielte hierbei zum Glück recht "zuverlässig" mit.

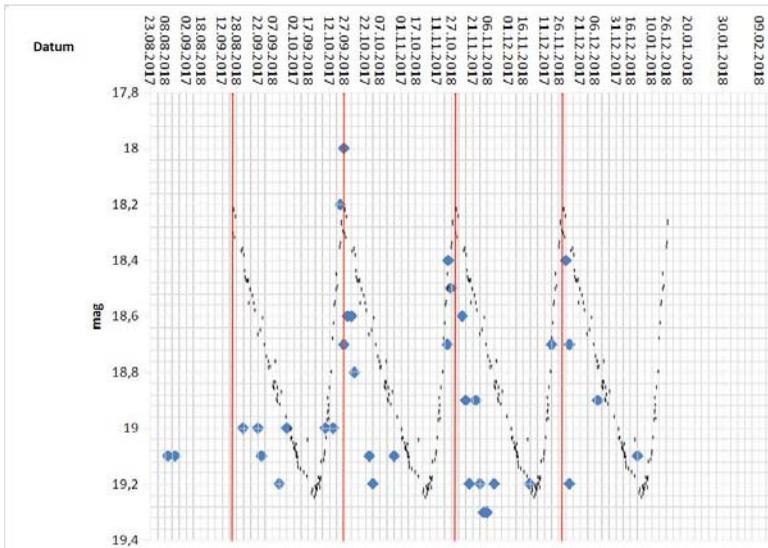


Abb. 10: Überlagerung mit der Helligkeitskurve von Delta Cephei [2] (gestrichelte Linie)

Auswertung und Ergebnisse

- a) Der Helligkeitsverlauf deutet auf einen Cepheiden-Veränderlichen hin.
- b) Die Pulsationsperiode kann auf einen Bereich von $P = 30\text{-}32$ d eingegrenzt werden (Literaturwert 31,4 d).
- c) Die scheinbare Helligkeit des M31-V1 variiert von 19,2 mag ($\pm 0,1$) im Minimum bis 18,2 mag ($\pm 0,2$) im Maximum.

Um auf dem historischen Weg zu bleiben, soll im Folgenden versucht werden, die gewonnenen Erkenntnisse weiter zu verwerten: Bei klassischen Cepheiden-Veränderlichen besteht empirisch ein Zusammenhang zwischen der Pulsationsperiode P in Tagen und der absoluten Helligkeit M . Vernachlässigt werden dabei galaktische oder intergalaktische Extinktion (durch Staub/nicht leuchtendes Gas) bzw. Blending-Effekte durch andere, nicht aufgelöste Sterne im gleichen Pixel-Bereich, weil sich beide Störfaktoren der Messbarkeit mit obiger Anordnung entziehen. Die sog. "Cepheiden-Formel" [4] wird ungeprüft als gültig angenommen und besagt:

$$M = -2,8 \cdot \log_{10} P - 1,43$$

Mithin ergibt sich aus dem ermittelten Bereich für die Pulsationsperiode P :

$$M_{\min} = -2,81 \cdot \log_{10} 30 - 1,43 = -5,58$$

$$M_{\max} = -2,81 \cdot \log_{10} 32 - 1,43 = -5,66$$

Die absolute Helligkeit des Sterns wäre somit recht hoch und läge im Bereich von -5,58 bis -5,66 M. Zum Vergleich: Die Sonne hat visuell eine absolute Helligkeit von etwa +4,87 M.

Rechnung: Faktor: $2,5^{4,87-(-5,66)} = 2,5^{10,53}$

Aus der Messung resultiert also ein Wert von etwa 15.000 Sonnenleuchtkräften.

Das "Ziel aller Mühen", und somit die wichtigste Erkenntnis, die Edwin Hubble aus Pulsationsperiode P, scheinbarer Helligkeit m und absoluter Helligkeit M gewinnen konnte, war keine Geringere, als die Entfernung des Sterns.

Der Zusammenhang zwischen der scheinbaren Helligkeit m und der absoluten Helligkeit M eines Objekts ist [5]:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} r - 5$$

Dabei ist r die Entfernung in Parsec. Diese Gleichung lässt sich zur Berechnung der Entfernung r des Objekts auflösen. Die Entfernung r in Lichtjahren kann damit in Abhängigkeit der Mittelwerte obiger Daten für scheinbare Helligkeit m und absolute Helligkeit M berechnet werden:

$$\begin{aligned} r &= 10^{(m-M+5):5} \cdot 3,26 \text{ Lj} \\ &= 10^{(18,75-(-5,62)+5):5} \cdot 3,26 \text{ Lj} = 2439032 \text{ Lj} \\ &\approx 2,4 \cdot 10^6 \text{ Lj} \end{aligned}$$

Auf diesem Weg wies Edwin Hubble 1923 nach, dass es sich bei dem Stern um ein Objekt weit außerhalb unserer Milchstraße handeln muss. Legt man der Berechnung noch die allgemein anerkannte Tatsache zugrunde, dass M31-V1 tatsächlich ein Stern in M31 ist, wäre mit Mitteln der modernen Amateur- und Schulastronomie, mit einer gewissen Toleranz, tatsächlich die Entfernung der Andromedagalaxie gemessen:

2,4 Mio. Lichtjahre.

Zusammenfassung und Diskussion

Tabelle 1 zeigt die mit o.g. Verfahren ermittelten Werte im Vergleich zu den historischen Daten bzw. Literaturwerten.

Kritiker mögen feststellen: Die gezeigte Arbeit bringt auf den ersten Blick inhaltlich keine neue Erkenntnis. Alle Daten sind längst bekannt und wurden/werden von professionellen astronomischen Vereinigungen mit geringerer Fehlertoleranz und weitaus zuverlässiger gemessen. Auch ist die Vorgehensweise gestützt auf die Orientierung an Literaturwerten bzw. kann diese bestenfalls bestätigen.

M31 - V1	Ermittelter Wert	Literaturwert
Sterntyp	Veränderlicher / Cepheid	Cepheid
Pulsationsperiode	30 - 32d	31,4 (+/-0,1)d (⁷ AAVSO, 2010)
Scheinbare Helligkeit m	18,2 - 19,2 (+/-0,2)	18,2 - 19,4 (⁷ Hubble, 1925)
Absolute Helligkeit M	- 5,58 bis - 5,66	k.A.
Sonnenleuchtkräfte	ca. 15000	k.A.
Entfernung zum Sonnensystem	2,4 Mio. Lj.	0,9 Mio. Lj. (⁸ Hubble, 1923) 2,52 +/- 0,14 Mio. Lj. (⁸ CSIC, 2005)

Tabelle 1

Diese und noch mehr Einwände sind durchaus legitim.

Ich kann sie auch nur soweit abschwächen, dass keine einzige Messung mit Blick auf ein "beabsichtigtes" Ergebnis durchgeführt wurde. Ein oder zwei "nötige" Pixel mehr oder weniger wären im Hinblick auf einen geringeren Fehler schnell "gefunden". Ziel der Arbeit war aber nie, möglichst genau an den Literaturwert heranzukommen. Vielmehr wollte ich mit meiner Tätigkeit prüfen, ob mit Amateur-Mitteln und einer weitgehend anschaulichen Mathematik überhaupt ein Einstieg in einen derartigen Grenzbereich möglich ist. Das Verfahren liefert sinnvolle Ergebnisse und kann von Schülern der 10. Jahrgangsstufe gut bewältigt werden. Dies wird auch durch die erfolgreiche "Jugend-forscht-Arbeit" meiner Schüler im Jahr 2018 bestätigt.

Mit modernen amateurastronomischen Geräten und der digitalen Foto- und Auswertungstechnik ist es Hobby-Forschern und auch Schülern recht gut möglich, abseits von Großteleskopen und professionellen Instituten einen Beitrag zur Forschung zu leisten. Dies gewinnt umso mehr an Stellenwert, je mehr Komplexität unser Verständnis des Universums annimmt. Viele kleine Erkenntnisse tragen immer mehr zu einem großen Ganzen bei.

Beobachtungszeit an Großsternwarten ist teuer, sehr speziellen und genau definierten Zielen und Beobachtergruppen vorbehalten und erfordert eine Menge an Verwaltungsaufwand und organisatorischer Vorbereitung. Beobachtungszeit an Schul- und Privatsternwarten ist dagegen in der Regel kostenlos, zielfoffen und erfordert eher eine Menge individuellen Zeitaufwand und vor allem persönliche Begeisterung und Engagement aller beteiligten Personen.

Literatur/Quellen:

1 https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/star-v1.html

2 Bildquelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delta_Cephei_lightcurve.jpg, 08.12.2018, 10:38MEZ)

3 Winnenburg, Wolfram, "Einführung in die Astronomie", BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim/Wien/Zürich, 1990

4 <https://de.wikipedia.org/wiki/Cepheiden>

5 Prof. Dr. Backhaus, Udo und Dr. Lindner, Klaus, "Astronomie Plus", Cornelsen-Verlag, Berlin 2005

6 <https://aladin.u-strasbg.fr/>

7 M. Templeton, A. Henden et al. "Modern observations of Hubble's first-discovered Cepheid in M31"

8 <https://de.wikipedia.org/wiki/Andromedagalaxie>