

Photometrie von Beteigeuze bei Tageslicht

Otmar Nickel

Version 1.1, 18. Dez. 2022

Dies ist ein Überblick über die Anforderungen für photometrische Beobachtungen von Beteigeuze bei Tageslicht. Amateurastronomen mit der richtigen Ausrüstung können einige bedeutende Beiträge zur astrophysikalischen Wissenschaft leisten. Erfahrung in der Photometrie ist erforderlich, etwas Erfahrung in der Planetenfotografie kann hilfreich sein.

Beobachtungszeitraum und Wetter

Die Tageslichtbeobachtungen von Beteigeuze sollten im März beginnen und Mitte September enden. Von Mai bis August sollten die Wetterbedingungen mit vielen klaren und trockenen Tagen günstig sein.

Ausrüstung

Fernrohr:

Am besten Newton mit 15-25cm Öffnung, F/4 – F/5. Refraktoren mit Öffnungen von 10-15 cm (F/8-F/10) können ebenfalls geeignet sein. Es können auch SC-Teleskope mit Öffnungen von 15-25 cm (mit Reducer) verwendet werden. Die Fokusslänge sollte zwischen 500 und 1500 mm liegen.

Fokussierer: Motorisierter Fokus mit gespeicherten Fokuspositionen ist hilfreich.

Sonnenfilter: Für die Positionierung und Fokussierung mit der Sonne ist ein Sonnenfilter erforderlich.

Flat Field Lightbox: Für die Erstellung von Flat Fields kann dies hilfreich sein. Tageslicht-Flats können auch mit einem Diffusor am Tubusende (z. B. weißes T-Shirt oder dünne Schaumstoffplatte) hergestellt werden.

Sonnenblende: Der optische Tubus sollte mit einer zylindrischen Sonnenblende ausgestattet sein, die 30-50 cm (etwa doppelt so groß wie die Öffnung) über die Öffnung hinausragt. Dies kann aus schwarzem Papier gemacht werden, das außen mit weißer Farbe bemalt ist. Zusammen mit einer sekundären Blende (für Newton) um die Okularauszugsöffnung herum sollte die Abschirmung Ausrichtungen von bis zu 10 Grad zur Sonne ermöglichen. Um eine Erwärmung der Kamera zu verhindern, kann auch die Oberseite des Teleskops abgeschirmt werden. Abb. 1 zeigt mein eigenes Teleskop (25 cm Newton).



Abb. 1: 25cm Newton Teleskop mit Abschirmung

Montierung:

Stabile Go-to-Montierung (äquatorial oder azimutal), vorzugsweise auf einer festen Säule; eine Positioniergenauigkeit von ± 2 Bogenminuten sollte erreicht werden. Encoder in beiden Achsen wären hilfreich.

Kamera:

Gekühlte Monochrom-CMOS-Kameras mit schnellem USB3-Ausgang werden bevorzugt. Planetenkameras ohne Kühler können auch verwendet werden, wenn bei jeder Beobachtung Dunkelbilder aufgenommen werden, eigene Tests mit ASI 178MM (ohne Kühlung) waren erfolgreich. Das gesamte Sichtfeld sollte groß genug sein, um einen Stern gut finden zu können, z. g. in der Größenordnung von etwa 30 Bogenminuten. Der ADC sollte 12-16 Bit haben, 14-16 Bit bevorzugt. CCD-Kameras mit elektronischem Verschluss können verwendet werden, aber das Auslesen der Bilder nimmt viel mehr Zeit in Anspruch. Vorteilhaft ist eine hohe Full-Well-Kapazität. Hier ist eine Tabelle mit einigen gekühlten Kameras, die verwendet werden können (ich kann nicht für korrekte Werte garantieren):

Camera	Sensor	Field of view (f=1000 mm) arcmin	ADC bits	Full well capacity	USB
Altair Hypercam 115M, ZWO ASI294MM Pro, QHY 294 Pro	Sony IMX492	65' x 44'	14	65 ke	3
Altair Hypercam 26M, ZWO ASI 2600MM Pro, QHY 268M	Sony IMX571 M	81' x 54'	16	51 ke	3
Altair Hypercam 183M Pro, ZWO ASI 183MM Pro, QHY183M	Sony IMX183	46' x 31'	12	15.5 ke	3
QHY 178M cool	Sony IMX178	25' x 17'	14	15 ke	3
QHY 174M cool	Sony IMX174	38' x 24'	12	32 ke	3

Tabelle 1: CMOS Kameras

Camera	Sensor	Field of view (f=1000 mm) arcmin	ADC bits	Full well capacity	USB
ATIK 460exm, Starlight Xpress Trius Pro SX694	Sony ICX694	43' x 34'	16	18 ke	2
Starlight Xpress Trius Pro SX825	Sony ICX825	31' x 23'	16	24 ke	2
Starlight Xpress Trius Pro SX814	Sony ICX814	43' x 34'	16	12 ke	2

Tabelle 2: CCD Kameras

Filter:

Um photometrische Ergebnisse zu erhalten, die mit anderen Beobachtungen vergleichbar sind, ist es notwendig, einen photometrischen V-Filter zu verwenden, z. g. der Baader V-Filter:

<https://www.baader-planetarium.com/de/filter/photometrische-filter/ubvri-bessel-v-filter-%E2%80%93-photometrisch.html>

Reduzieren Sie die Lichtintensität möglichst durch einen Graufilter mit etwa 1 Prozent Transmission (ND 2,0 oder ähnlich), z. B. der Baader Filter ND1.8 (1,5% Transmission):

[https://www.baader-planetarium.com/de/filter/polarisation-neutraldichte/neutraldichte-\(grau\)-filter-nd-06--09--18--30.html](https://www.baader-planetarium.com/de/filter/polarisation-neutraldichte/neutraldichte-(grau)-filter-nd-06--09--18--30.html)

Die Baader ND-Filter haben eine sehr konstante Transmission über das sichtbare Spektrum und können mit dem photometrischen V-Filter kombiniert werden; die Transmissionskurve des V-Filters bleibt praktisch unverändert. Der ND-Filter sollte vor dem V-Filter platziert werden, dies verhindert eine Beschädigung des photometrischen Filters, wenn das Teleskop (aus Versehen) längere Zeit der Sonne ausgesetzt wird.

Software

Die meisten Teleskop- und Imaging-Softwaretools können verwendet werden. Für automatisierte Abläufe kann z.B. meine eigene Software „starpilot“ (<https://sternwartebersheim.astronomie-mainz.de/software>) benutzt werden.

Für die Bearbeitung von Bildern (z. B. Stacken) wird das Programm „Fitswork“ empfohlen: (https://www.fitswork.de/software/softw_en.php)

Zur Photometrie kann mein Programm „fitsmag“ (<https://sternwartebersheim.astronomie-mainz.de/software/fitsmag>) benutzt werden.

Beobachtungen

Sterne bei Tageslicht finden

Um einen Stern bei Tageslicht zu finden, muss zuerst das Koordinatensystem der Montierung kalibriert werden (außer diese hat Absolut-Encoder und ist bereits kalibriert), am besten in der Nacht vor der Beobachtung. Bei Tageslicht kann zumindest mit der Sonne synchronisiert werden (mit Sonnenfilter!). Die Fokus-Position sollte vor der Sternsuche eingestellt werden, da der Kontrast zwischen einem defokussierten Stern und dem Himmel sehr gering ist; dies kann z.B. mit dem gefilterten Sonnenbild durchgeführt werden. Wichtiger Hinweis: Schauen Sie nicht in die Sonne, wenn der Stern in Sonnennähe steht; Verwenden Sie kein Sucherfernrohr!

Bildaufnahme

Um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erhalten, wird eine Reihe von FITS-Bildern erfasst (im 16-Bit-Modus!) und gestackt. Die resultierenden Bilder müssen Dark- und Flat- korrigiert sein. Die Gesamtbelichtungszeit sollte mindestens 10 Sekunden betragen. Es ist sinnvoll, das Stacken in Gruppen vorzunehmen: Das anfängliche Stacken kann automatisch (Stapeln ohne Ausrichten) für 1 oder 2 Sekunden erfolgen, etwa 10 dieser Stapel werden (nach Dark- und Flatkorrektur) für eine spätere Verarbeitung (mit Ausrichten) gespeichert. Dies kann z.B. durch die Software „firecapture“ (<http://www.firecapture.de/>) oder mit meiner Software „Starpilot“ (<https://sternwartebersheim.astronomie-mainz.de/software/>) oder mit der Software des Kameraherstellers durchgeführt werden.

Wichtiger Hinweis: Wenn automatisches Stapeln (oder „Live-Stacking“) verwendet wird, sollten die resultierenden gestapelten Bilder eine 32-Bit-Summe oder ein 16-Bit-Mittelwert der Originalbilder ohne Skalierung sein. Einige Apps (z. B. SharpCap) skalieren die Pixelanzahl so, dass das maximale Pixel immer den gleichen Wert hat (max. 16bit oder 32bit); mit diesen Daten ist Photometrie nicht möglich. In diesem Fall müssen zunächst alle Rohbilder gespeichert werden.

Die Belichtungszeit für eine Einzelaufnahme hängt hauptsächlich von der maximalen Helligkeit des Himmels ab. Die ADUs des Himmels sollten etwa 40 % der Sättigungs-ADUs nicht überschreiten. Daher sollte am Anfang eine Testbelichtung am hellsten Himmelsbereich (am sonnennächsten Stern) gemacht werden. Mit dem ND-Filter von 1,5 % Transmission liegt die Belichtung im Bereich von 20-150 ms. Für alle Sterne (Beteigeuze und Vergleichssterne) muss die gleiche Belichtung verwendet werden. Zusätzlich sollte eine Testbelichtung des hellsten Sterns (kann Beteigeuze oder Rigel sein) erfolgen. Befindet sich das Sternmaximum nahe der Sättigung, muss die Belichtungszeit reduziert oder eine leichte Defokussierung vorgenommen werden; die FWHM der Sterne sollte etwa 10 Pixel betragen. Beispiel eines solchen Vorgehens für jeden Stern: 200 Belichtungen von 50 ms dark- und flat-korrigierten Bildern; die Gesamtbelichtungszeit würde in diesem Beispiel 10 Sekunden betragen.

Vergleichssterne

Zusammen mit Beteigeuze sollten mindestens 4 Vergleichssterne beobachtet werden, siehe Tabelle 3. Einige dieser Sterne sollten nicht verwendet werden, wenn sie zu nahe ($< 20^\circ$) an der Sonne stehen (siehe Tabelle). Zusätzlich kann Gamma Ori (Bellatrix) als Checkstern verwendet werden ($V=1.637$ mag, $B-V=-0.224$). Die Magnituden (aus dem GCPD-Katalog) der Vergleichssterne weichen geringfügig von den Magnituden in meiner Arbeit in der JAAVSO (Dez. 2021) ab, wo ich die Magnituden aus dem XHIP-Katalog verwendet habe.

Stern	V-mag (GCPD)	B-V	Abstand zur Sonne < 20°
β Ori (Rigel)	0.138	-0.030	
α CMi (Prokyon)	0.366	0.432	6. Juli – 30. Juli
α Tau (Aldebaran)	0,87	1.538	12. Mai – 20. Juni
β Gem (Pollux)	1.143	0.991	26. Juni – 5. August
β Tau (Elnath)	1.650	-0.130	25. Mai – 3. Juli
ζ Ori (Alnitak)	1.740	-0.199	
β Aur (Menkalinan)	1.900	0.077	
γ Gem (Alhena)	1.928	0.001	11. Juni – 20. Juli
α Ari (Hamal)	2.008	1.151	11. April – 15. Mai

Tabelle 3: Vergleichssterne

Um eine gute Abschätzung der Extinktions-Konstante zu erhalten, sollten die Vergleichssterne über einen weiten Bereich von Luftmassen verteilt sein, möglichst zwischen 1,0 und 2,2.

Bildverarbeitung

Für jeden Stern wird die Bildserie gestackt, verbunden mit der Ausrichtung der Sternzentren. Dies kann mit jeder Astro-Bildverarbeitungs-Software erfolgen, z. Fitswork (https://www.fitswork.de/software/softw_en.php). Das Stacking-Ergebnis kann eine Summe oder ein Mittelwert der Bildpixel sein. Wenn das Ergebnis eine Summe ist und die Anzahl der gestapelten Bilder von Stern zu Stern unterschiedlich ist, muss das Ergebnis durch die individuelle Anzahl der gestapelten Bilder dividiert werden (um einen Mittelwert zu erhalten), sonst können die Bilder nicht miteinander verglichen werden.

Photometrie

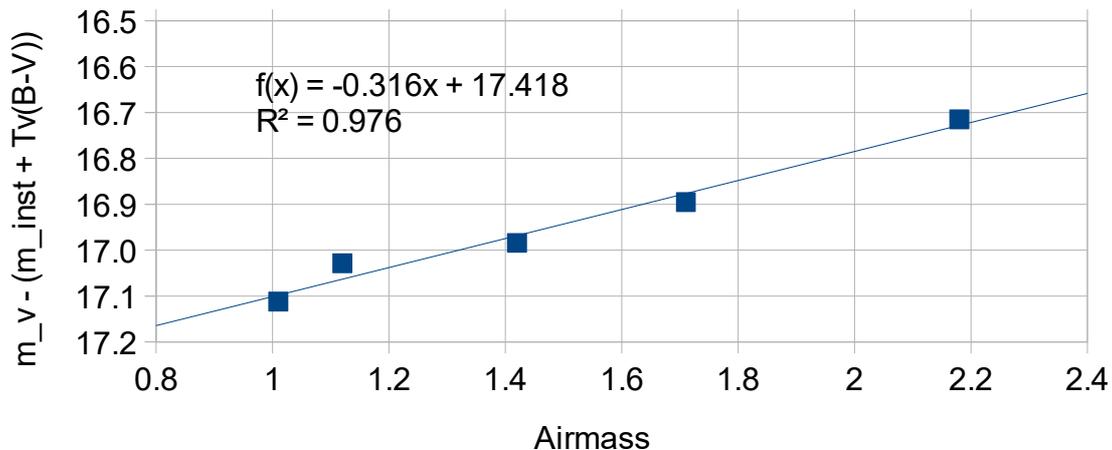
Als nächster Schritt muss für jeden Stern eine **instrumentelle Magnitude** berechnet werden. Dies kann durch meine eigene Software „Fitsmag“ (<https://sternwartebersheim.astronomie-mainz.de/software/fitsmag>) oder durch andere Photometrie-Software erfolgen. Wenn Apertur-Photometrie verwendet wird, muss für jeden Stern die gleiche Apertur verwendet werden. Der nächste Schritt ist die Berechnung der Nullpunktgröße m_0 und der Extinktionskonstante k_v . Dazu werden die instrumentellen Magnituden und die entsprechende Luftmasse der Vergleichssterne in einer Tabellenkalkulation eingetragen. Ein Beispiel für eine solche Tabelle ist hier abgebildet (eigene Beobachtungen vom Juli 2021):

Stern	m_{inst}	m_v (GCPD)	B-V	Luftmasse	$m_v - (m_{inst} + T_v * (B-V))$
α CMi	-16.617	0.366	0.432	1.420	16.984
β Aur	-15.212	1.900	0.077	1.010	17.112
β Tau	-15.379	1.650	-0.130	1.120	17.029
ζ Ori	-15.156	1.740	-0.199	1.710	16.895
β Ori	-16.577	0.138	-0.030	2.180	16.715

Die Werte in der letzten Spalte errechnen sich aus der Kataloghelligkeit m_v , der Instrumentenhelligkeit m_{inst} und dem Farbkorrekturterm $T_v * (B-V)$. Für T_v wurde ein Wert von -0,0026 ermittelt.

Wenn die Werte der berechneten letzten Spalte gegen die Luftmassenwerte aufgetragen werden, sollten die Punkte mehr oder weniger auf einer geraden Linie liegen, wie in folgender Graphik gezeigt:

Airmass plot 2021-07-18 10:26 UT



Die Werte für m_0 und k_v ergeben sich aus einer linearen Regression, die den Parametern der Regressionsgeraden entnommen werden kann: $m_0 = 17,418$; $k_v = 0,316$ (negative Steigung).

Aus diesen Parametern, der instrumentellen Helligkeit m_{inst} , der Luftmasse (Airmass) und dem Farbindex (1,85) von Beteigeuze lässt sich die standardisierte Helligkeit m_v von Beteigeuze berechnen:

$$m_v = m_{inst} + T_v \cdot (B-V) + m_0 - k_v \cdot \text{Airmass}$$

Beteigeuze hatte $m_{inst} = -16,403$ bei einer Luftmasse von 1,39, ergibt $m_v = 0,571$

Der Fehler dieser Messung lässt sich, wenn die Fehler von m_{inst} und k_v vernachlässigt werden können, aus dem Standardfehler der linearen Regression berechnen. Dies kann in der Tabellenkalkulation berechnet werden. Im obigen Beispiel beträgt dieser Fehler 0,027 mag.

Für Bellatrix (Gamma Ori) war das Ergebnis in diesem Beispiel $m_v = 1,594$ (GCPD: 1,637; GCVS: 1,59-1,64)

Es gibt 3 Möglichkeiten der Qualitätskontrolle:

Der Regressionskoeffizient R^2 der Regressionsgerade sollte $>0,90$ sein

Der Standardfehler der linearen Regression sollte $<0,05$ mag sein

Die Abweichung der Sternhelligkeiten zur Kataloghelligkeit sollte $<0,05$ mag sein.

Wenn eines oder mehrere dieser Kriterien nicht gegeben sind, kann das mehrere Gründe haben:

- (1) Himmel ist nicht ganz klar (dünne Wolken)
- (2) Belichtung zu lang (gesättigte Pixel)
- (3) Unzureichende Kameralinearität oder Verarbeitungsfehler

Um die Genauigkeit des Ergebnisses zu verbessern, sollte innerhalb von ein bis zwei Stunden eine zweite Bildaufnahme mit den selben Sternen erfolgen. Die Ergebnisse der Magnituden von Beteigeuze und Bellatrix des ersten und zweiten Laufs lassen sich zu einem Tagesmittelwert zusammenfassen.

Weitere Informationen finden Sie in meinem Paper:

“Daylight Photometry of Bright Stars—Observations of Betelgeuse at Solar Conjunction”

(<https://app.aavso.org/jaavso/article/3798/>)

Update 02.08.2022

Zusätzliche Ausrüstung:

Um zu kontrollieren, ob Wolken oder Kondensstreifen während der Aufnahme stören, habe ich eine Spiegelreflexkamera mit 100mm Objektiv (Canon EOS 450) am Teleskop montiert (Abb. 2). Ein Livebild der Kamera kann am Computer angezeigt werden (Abb. 3).



Abbildung 2: Wolkenkamera am Teleskop

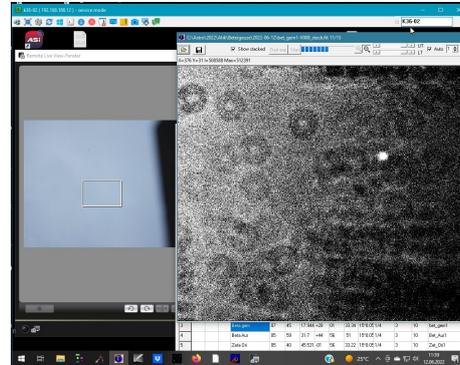


Abbildung 3: Livebild der Wolkenkamera und Teleskopbild

Das Gesichtsfeld der Kamera ist wesentlich größer als das der Teleskopkamera, sodass nahe Wolken rechtzeitig erkannt werden können.

Bei Fragen können Sie mich per Mail kontaktieren: otmar.nickel@web.de