

Doppelsterne

Messung von Abstand und Positionswinkel mit kleinen Teleskopen

Version : 1.21

Datum : 22.06.22

Autor : Heiko Wichmann

Lizenz : CC-BY-NC-SA 4.0

Inhaltsverzeichnis

1 Doppelsterne – Eine kurze Einführung.....	3
2 Messsystem zum Erfassen von Doppelsternen.....	4
2.1 Verwendetes Messsystem.....	4
2.1.1 Detektor.....	4
2.1.2 Teleskop.....	4
2.1.3 Montierung und Steuerung.....	4
2.2 Verwendung von Filtern und weiteren optischen Komponenten.....	5
3 Auflösungsvermögen & Abbildungsmaßstab.....	6
3.1 Auflösungsvermögen.....	6
3.1.1 Berechnungsbeispiel 120/900 Equinox.....	7
3.1.2 Weitere Einflussfaktoren.....	7
3.2 Abbildungsmaßstab.....	8
3.3 Optimaler Abbildungsmaßstab für Doppelsternmessungen.....	8
3.4 Trennbarkeit von Doppelstern-PSFs.....	9
4 Messfehler bei Doppelsternmessungen.....	10
4.1 Einfluss der Fernrohbrennweite auf die Messgenauigkeit.....	10
4.2 Exakte Brennweitenermittlung eines Refraktors.....	10
4.3 Bessel-Methode.....	10
4.3.1 Brennweitenermittlung beim SW Equinox nach Bessel.....	11
4.4 Brennweitenermittlung mittels Baader Microguide Okular.....	12
4.4.1 Equinox 120/900 : ϵ Orionis (-1,18°).....	12
4.4.2 Williams 80/545 : ϵ Orionis (-1,18°).....	13
4.5 Brennweitenermittlung anhand eines Referenz-Doppelsterns.....	13
4.6 Atmosphärische Refraktion.....	13
4.7 Seeing.....	14
4.8 Atmosphärische Dispersion.....	14
4.9 Systematischer Fehler in AIP4Win.....	14
4.10 Bildfeldkrümmung.....	14
4.11 Polar Alignment.....	15
4.12 Standardabweichung.....	15
5 Baader Micro-Guide Messokular.....	16
5.1 Baader Micro-Guide Messokular Skalen.....	16
5.2 Baader Micro-Guide Messokular Abbildungsmaßstab.....	16
5.3 Abbildungsmaßstab für Equinox 120/900.....	17
6 Kalibrierung des Messsystems.....	18
6.1 Kamera-Ausrichtung & Software-Konfiguration.....	18
6.2 Kalibrierungs-Doppelsterne.....	19
6.3 Richtlinien für die Auswahl von Referenz-Doppelsternen.....	19
6.4 Kalibrierung am Beispiel von Mizar (STFA 1744).....	20
7 Doppelsternmessungen - Datenreduktion.....	21
7.1 Stacking mit AutoStakkert!.....	21
8 Analyse der Messdaten.....	25
8.1 Analyse mittels AIP4Win.....	25
8.2 Analyse mittels Fitswork.....	26
9 Beispiel für eine Messung - STF 1888.....	27
9.1.1 General Information.....	27
9.1.2 Equipment information.....	27
9.1.3 Image processing information.....	27
9.1.4 Measurement Results.....	27
10 Aladin Sky Atlas.....	28
10.1 Aladin Konfiguration auf J2016 für Gaia DR3.....	28
10.2 Messung eines Doppelsterns in Aladin.....	30
11 Abbildungsverzeichnis.....	31
12 Copyright und Lizenzen.....	31
13 Referenzen.....	32
14 Annex A.....	33
14.1 Bildinformationen.....	33
15 Annex B.....	34
15.1 Links.....	34

1 Doppelsterne – Eine kurze Einführung

Grundsätzlich werden optische und physische Doppel- oder Mehrfachsterne unterschieden. Erstere sind Sterne, die nur zufällig in einer Sichtlinie stehen, im dreidimensionalen Raum aber weit hintereinander und nicht gravitativ gebunden sind. Physische Doppel- und Mehrfachsterne sind gravitativ gebunden. Der Fokus dieses Artikels liegt auf Doppel- und Mehrfachsterne, im Weiteren nur noch Doppelsterne genannt.

Physische Doppelsterne lassen sich in unterschiedliche Kategorien einteilen. Visuelle Doppelsterne lassen sich mit bloßem Auge oder optischen Hilfsmitteln (Fernglas, Teleskop) trennen und vermessen.

Spektroskopische Doppelsterne liegen so dicht beieinander, dass sie mit optischen Hilfsmitteln nicht mehr getrennt werden können, sich aber im Spektrum durch Doppler-Verschiebungen bemerkbar machen.

Blicken wir direkt auf die Kante der Umlaufbahn von Doppelsternen, kann dies zu einer gegenseitigen Bedeckung der Sterne führen, analog zu einer Sonnenfinsternis. Die Bedeckungen führen zu periodischen Helligkeitsschwankungen, die die Doppelsternnatur verraten. Sternenpaare dieser Art werden auch Bedeckungsveränderliche genannt.

Zuletzt gibt es noch astrometrische Doppelsterne, die sich erst im Verlauf der Zeit aufgrund einer nicht linearen Bewegung am Himmel verraten. Einzelsterne haben eine konstante Bewegung am Himmel, astrometrische Doppelsterne schwanken in ihrer Bewegung periodisch hin und her. Schwankungen in der Bewegung machten z.B. Astronomen auf Sirius B aufmerksam.

Doppelsterne werden in verschiedensten Büchern über Astronomie grundsätzlich und umfassend beschrieben. Eine kurze deutschsprachige Einführung ist z.B. auch im Internet zu finden bei [Wikipedia](https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstern).

Die von der Erde aus sichtbaren Doppelsterne werden zunächst in zwei Dimensionen erfasst, da sich der Himmel über uns kugelförmig erstreckt. Die tatsächlichen dreidimensionalen Anordnungen und Bewegungen von Doppelsternen lassen sich ggf. auch, allerdings deutlich aufwendiger, ermitteln. Dieser Artikel beschränkt sich im Weiteren auf die Erfassung von Doppelsternen und Messungen in zwei Dimensionen am Himmel und nicht auf die Ermittlung von Bahnparametern im dreidimensionalen Raum.

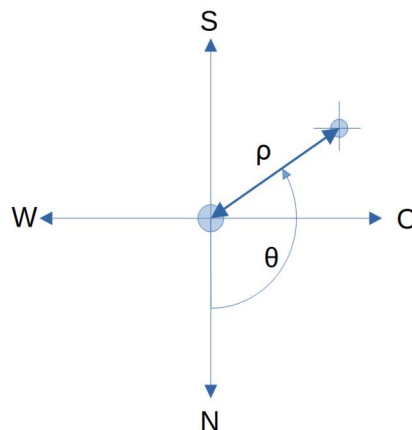


Abbildung 1: Doppelstern, Ansicht im astronomischen Fernrohr (umgekehrt und seitenverkehrt)

Grundsätzlich werden Doppelsterne über die Separation ρ (RHO), den Abstand der Komponenten und den Positionswinkel θ (THETA) charakterisiert. Der Positionswinkel wird dabei in Grad $[\circ]$ gemessen von 0° .. 360° , beginnend im Norden über Ost, Süd und West. Der Ursprung ist dabei die hellere Komponente.

ρ – (RHO) Separation/Abstand in der Regel in Bogensekunden $["]$

θ – (THETA) Positionswinkel von Nord über Ost gemessen in Grad $[\circ]$

2 Messsystem zum Erfassen von Doppelsternen

Ein Messsystem zum Erfassen von Separation und Positionswinkel von Doppelsternen setzt sich zusammen aus dem verwendeten Fernrohr, der Montierung und dem Detektor. Maßgeblich für den Abbildungsmaßstab ist hierbei die Brennweite des Fernrohrs und der zusätzlichen optischen Komponenten.

Teleskope mit unveränderlicher Brennweite sind vorteilhaft bezüglich der Bestimmung des Abbildungsmaßstabs. Systeme mit variabler Brennweite z.B. mit Hauptspiegelfokussierung sind hier mit Vorsicht zu betrachten, da sich der Abbildungsmaßstab ändern kann, was sich negativ auf die Kalibrierung auswirkt. Grundsätzlich gut geeignet sind z.B. Refraktoren und auch Newton-Teleskope. Bei Refraktoren ist dabei zu beachten, dass diese teilweise mit chromatischer Aberration behaftet sind, welche je nach Refraktortyp (FH, ED, APO) Einfluss auf die Genauigkeit der Messergebnisse haben kann. Bei Newton-Teleskopen ist der Effekt der Fangspiegelhalterung zu betrachten. Die Spikes können im ungünstigsten Fall eine schwache Doppelstern-Komponente überdecken.

Eine parallaktische Montierung erleichtert die Bestimmung des Positionswinkels deutlich, da pro Mess-Kampagne **eine** Kalibrierung ausreichend ist. Bei einer azimutalen Montierung z.B. nach Dobson ändert sich der Winkel im Detektor mit der Zeit/Erddrehung, was die Kalibrierung der Nord-Südrichtung deutlich erschwert und im Prinzip bei jeder Messung eine Re-Kalibrierung erforderlich macht.

Als Detektoren resp. zur Messung wurden historisch z.B. (Filar-) Mikrometer verwendet und astrometrische Okulare, z.B. das Micro-Guide Okular von Baader/Celestron. Moderner und meist auch genauer ist heute die Verwendung von CCD oder CMOS-Detektoren [13].

2.1 Verwendetes Messsystem

2.1.1 Detektor

Im weiteren Verlauf dieses Artikels wird als Detektor eine einfache ZWO ASI 120MC-S 1,2 Megapixel (1280 x 960) CMOS USB 3.0 Kamera mit quadratischen Pixeln der Größe 3,75 µm verwendet. Empfehlenswert ist es, die vom Hersteller der Kamera angegebene Pixelgröße anhand des Datenblattes des verwendeten lichtempfindlichen Chips zu verifizieren. In der Regel wird bei der Beobachtung der Ausschnitt auf 800 x 600 Pixel verkleinert, um das Datenvolumen zu reduzieren und die Bearbeitung später zu beschleunigen.

2.1.2 Teleskop

Für die folgenden Messungen wird ein 120/900 mm Skywatcher/Equinox ED APO verwendet. Um das finale Einstellen auf den Detektor-Mittelpunkt zu erleichtern, ist parallel zu dem Equinox noch ein 60/800 mm Leitrohr montiert. Das Leitrohr ist dabei mit dem Baader Microguide Messokular bestückt und erlaubt so das exakte Einstellen des Doppelsterns bei einer Vergrößerung von 64x.

Für die exakte Fokussierung zu Beginn einer Messkampagne kann mittels einer Scheiner-Blende erfolgen. Diese Aperturblende besteht aus drei Löchern mit jeweils 40 mm Öffnung, die jeweils um 120° versetzt um die optische Achse herum angebracht sind. Aufgrund des gewählten Abbildungsmaßstabs kann die Fokussierung auch direkt an einem geeigneten Stern über die Live-View Funktion der Kamera erfolgen.

2.1.3 Montierung und Steuerung

Verwendung findet eine parallaktische Montierung GPD2 von Vixen, welche GOTO mittels Boxdörfer Steuerung erlaubt. Zur Aufsuchen von Doppelsternen ist die GOTO-Funktion in Kombination mit dem Leitrohr und ggf. einem 50 mm Sucher ausreichend präzise.

Je nachdem, auf welcher Seite der Montierung sich das Fernrohr befindet (in Richtung Süden ausgerichtet) muss die Boxdörfer Steuerung entsprechend konfiguriert werden. Dazu dient die Einstellung **SwitchDec**, welche im Menü unter GOTO-CATALOG gefunden werden kann.

- Befindet sich das Teleskop auf der **rechten** Seite der Montierung : **SwitchDec = left** (default)
- Befindet sich das Teleskop auf der **linken** Seite der Montierung : **SwitchDec = right**

2.2 Verwendung von Filtern und weiteren optischen Komponenten

Manche Beiträge im Netz empfehlen die Verwendung von Filtern bei der Vermessung von Doppelsternen. Bei Refraktoren können z.B. Grün-, Gelb-, Rot-, (Infrarot-) oder auch Linien-Filter (Solar-Kontinuum von Baader / 540 nm) mögliche Fehler aufgrund von chromatischer Aberration und atmosphärischer Dispersion reduzieren oder ganz vermeiden.

Des Weiteren haben Filter einen Einfluss auf das Auflösungsvermögen. Grundsätzlich ist das Auflösungsvermögen abhängig von der verwendeten Wellenlänge und im kurzwelligen blauen Bereich geringfügig höher als im roten Bereich. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass gerade Refraktoren im blauen Bereich häufig weniger gut korrigiert sind, (Voll-)APOs ausgenommen.

Für die klassischen Fraunhofer Referenz-Linien ergeben sich damit folgende Auflösungsvermögen am Beispiel des 120/900 mm Skywatcher Equinox.

Fraunhofer Linie	Farbe	Wellenlänge [nm]	Auflösungsvermögen ["]
F'	Blau (B)	480	1,01"
n _e	Grün (G)	546	1,14"
C'	Rot (R)	644	1,35"

– Wellenlängenabhängiges Auflösungsvermögen nach Rayleigh –

Insbesondere FH-Refraktoren können je nach Brennweite und Öffnungsverhältnis eine signifikante Restchromasie (RC) zeigen, welche bei Messungen zu Abweichungen führen kann. Bei Farb-Detektoren lohnt es sich hier ggf. das Summenbild in die einzelnen R-G-B-Komponenten aufzuspalten und diese separat auszumessen.

Und zu guter Letzt können bestimmte Farbfilter die atmosphärische Dispersion, die einen beträchtlichen Messfehler einführen kann, reduzieren oder sogar ganz eliminieren. Dazu mehr weiter unten.

Zur Brennweitenverlängerung können bei der Vermessung von Doppelsternen Barlow-Linsen zur Anwendung kommen. Hier ist speziell auf die gute Qualität der Barlow zu achten, da man sich bei der Vermessung von Doppelsternen bereits im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit aller optischen Komponenten befindet. Zur Bestimmung des geeignetsten Barlow-Faktors siehe das Kapitel weiter unten.

Aktuell findet eine 2x Barlow-Linse vom Typ TSSHORTY TSOptics 1,25" 2x-APO-Barlow-Linse, 3-elementig Verwendung.

Da die Brennweite des Equinox mit/ohne 2x Barlow-Linse sehr präzise ermittelt wurde mittels des Bessel-Verfahrens und insbesondere mittels eines Baader Microguide Mess-Okular [4.3 und 4.4] beschränkt sich die Kalibrierung des Messsystems auf die Verifikation der ursprünglich ermittelten Brennweite und auf die Kalibrierung des Positionswinkels.

3 Auflösungsvermögen & Abbildungsmaßstab

3.1 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Teleskops hängt im Wesentlichen ab von dem Durchmesser der Airy Disk ($D_{\text{airy}} [\text{m}] / \delta_{\text{airy}} ["]$) welcher sich in Meter resp. Bogensekunden wie folgt berechnet:

$$D_{\text{airy}} = \frac{2,44 \cdot \lambda \cdot f}{D} = 2,44 \cdot \lambda \cdot N$$

$$D_{\text{airy}} [\text{m}] / D = \text{Apertur} [\text{m}] / \lambda = \text{Wellenlänge} [\text{m}] / f = \text{Brennweite} [\text{m}]$$

$$\delta_{\text{airy}} = \frac{2,44 \cdot \lambda}{D} \cdot 206265$$

$$\delta_{\text{airy}} ["] / D = \text{Apertur} [\text{m}] / \lambda = \text{Wellenlänge} [\text{m}]$$

Grundsätzlich gibt es nun zwei gebräuchliche Ansätze, um das Auflösungsvermögen eines Teleskops zu ermitteln, die Variante nach Rayleigh und die Variante nach Dawes. Nach Rayleigh liegen die Zentren der beiden Airy Disk in einem Abstand von $D/2$ wie im Bild unten dargestellt. Die Intensität bei gleich hellen Komponenten sinkt hierbei zwischen beiden Komponenten um rund 27% (~30%) ab.

$$\alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot 206265 = \frac{0,1384}{D}$$

$$\alpha ["] / D = \text{Apertur} [\text{m}] / \lambda = \text{Wellenlänge} [\text{m}] (550 \text{ nm})$$

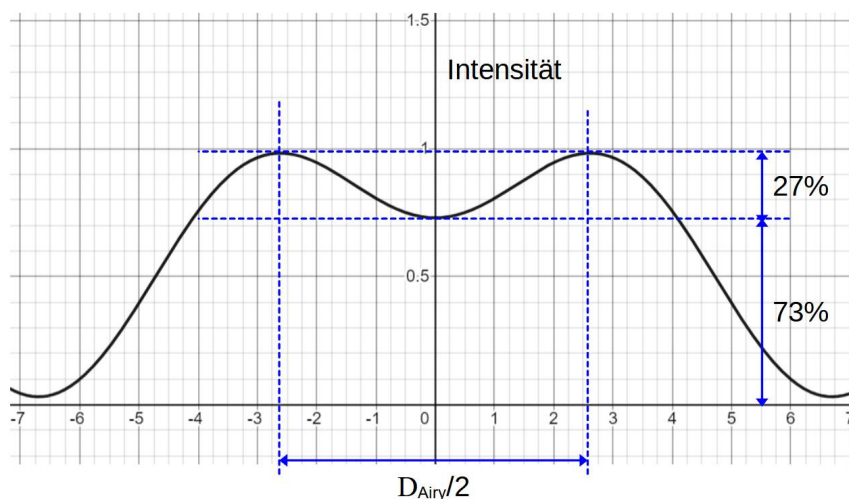


Abbildung 2: Rayleigh Kriterium – Erstellt mittels desmos [13]

Bei guten Bedingungen kann das menschliche Auge allerdings auch noch Helligkeitsunterschiede von rund 5% zwischen zwei (gleich hellen) Komponenten erkennen. Dies entspricht dem Auflösungsvermögen nach Dawes und wird näherungsweise wie folgt berechnet:

$$\alpha = \frac{1,02075 \cdot \lambda}{D} \cdot 206265 = \frac{0,1158}{D}$$

$$\alpha ["] / D = \text{Apertur} [\text{m}] / \lambda = \text{Wellenlänge in} [\text{m}] (550 \text{ nm})$$

3.1.1 Berechnungsbeispiel 120/900 Equinox

Durchmesser der Airy Disk in [m] resp. [μm] :

$$D_{\text{Airy}} = \frac{2,44 \cdot \lambda \cdot f}{D} = 2,44 \cdot \lambda \cdot N = 2,44 \cdot 550 \cdot 10^{-9} \cdot 7,5 = 0,000010065 [\text{m}] = 10,065 [\mu\text{m}]$$

Winkelausdehnung der Airy Disk (von Nullstelle zu Nullstelle) in Bogensekunden :

$$\delta_{\text{Airy}} = \frac{2,44 \cdot \lambda}{D} \cdot 206265 = \frac{2,44 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{0,12} \cdot 206265 = 2,306 ''$$

Auflösungsvermögen in Bogensekunden nach Rayleigh :

$$\alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot 206265 = \frac{1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{0,12} \cdot 206265 = 1,15 ''$$

nach Dawes :

$$\alpha = \frac{0,1158}{D} = \frac{0,1158}{0,12} = 0,97 ''$$

3.1.2 Weitere Einflussfaktoren

In der Praxis kommen allerdings weitere Faktoren zum Tragen, die das tatsächliche Auflösungsvermögen eines Teleskops bestimmen. Dieses kann je nach Faktor auch zu einem höheren Auflösungsvermögen führen als eigentlich erwartet wurde anhand der Gleichungen oben:

- (Unterschiedliche) Helligkeiten der beteiligten Komponenten
- Farbe der beteiligten Komponenten
 - wellenlängenabhängiges Auflösungsvermögen des Teleskops
 - wellenlängenabhängige Größe der Airy-Disk
 - wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei visueller Beobachtung
 - atmosphärische Dispersion
- **Wahrnehmungsschwelle** des menschlichen Auges bei visueller Beobachtung [9]
 - schwächere Sterne haben eine kleinere Airy-Disk
 - bei schwächeren Sternen erhöht sich das visuelle Auflösungsvermögen
- Vergrößerung des Teleskops
 - Empirische Studien haben ergeben (Couteau [1]), dass die nützliche **Mindest**-Vergrößerung für Doppelsternbeobachtungen dem doppelten Objektivdurchmesser in Millimeter entspricht.
- Obstruktion des Teleskops
- Verwendung von Objektivmasken (Gauss-Masken)

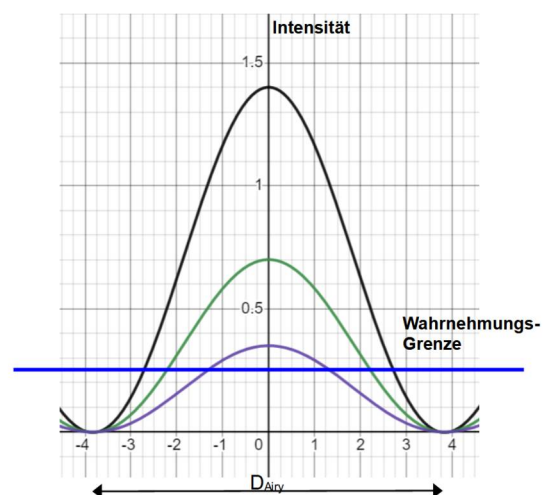


Abbildung 3: Erstellt mittels desmos [13]

3.2 Abbildungsmaßstab

Der Winkel pro Pixel der auf dem Detektor abgebildet wird errechnet sich wie folgt :

$$\alpha = \frac{206,265 \cdot P_s}{f}$$

P_s – Pixelgröße in [μm] / f – Brennweite in [mm] / α – Bogensekunden ["/Pixel]

Dies führt z.B. bei dem o.g. SW Equinox in Kombination mit der ZWO ASI 120MC-S bei 900 mm Brennweite zu folgendem theoretischen Abbildungsmaßstab :

$$\alpha = \frac{206,265 \cdot 3,75}{900} = 0,86 \rightarrow 0,86 \text{ ["/Pixel]}$$

Für die in Kapitel 4.3 ermittelten tatsächlichen Brennweiten mit/ohne 2x Barlow-Linse ergeben sich folgende Abbildungsmaßstäbe ["/Pixel] :

Primärfokus :

$$\alpha = \frac{206,265 \cdot 3,75}{901,3} = 0,8582$$

Mit 2x Barlow-Linse :

$$\alpha = \frac{206,265 \cdot 3,75}{1864} = 0,4150$$

Dies ist allerdings noch nicht der optimale Abbildungsmaßstab für diese Kombinationen für die Vermessung von Doppelsternen. Hierzu siehe das auch das nächste Kapitel.

3.3 Optimaler Abbildungsmaßstab für Doppelsternmessungen

Der optimale Abbildungsmaßstab für Doppelsternmessungen ist anders als bei herkömmlicher Astrofotografie. Ziel bei Doppelsternmessungen ist es, für die Vermessung ausreichend große ‚Centroids‘ zu erreichen. Im Weiteren nun die Herleitung des optimalen Abbildungsmaßstabs für den 120 mm Equinox ED APO. Der Durchmesser des Airy-Scheibchens laut 3.1 beträgt $\delta_{\text{Airy}} = 2,307''$ resp. der Radius $r_{\text{Airy}} = 1,153''$ Bogensekunden.

$$\delta_{\text{Airy}} = \frac{2,44 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{0,120} \cdot 206265 = 2,307''$$

Laut [11] folgt der Intensitätsverlauf des Beugungsscheibchens und der Beugungsringe einer Besselfunktion erster Art. Für diese Besselfunktion gilt :

- hat bei $r = 0$ den Funktionswert 1
- hat bei $r = 0,5145$ den Funktionswert 1/2 (50 % der Intensität) $\rightarrow$ FWHM Punkt
- hat bei $r = 1,2197$ die erste Nullstelle

Somit wird bei $r_{\text{Airy}} = 1,153''$ die erste Nullstelle erreicht ($\Rightarrow$ Wert 1,2197 der Besselfunktion). Der Punkt der Besselfunktion bei dem 50% der Intensität erreicht wird errechnet sich zu :

$$R_{\text{FWHM}} = \frac{1,153}{1,2197} \cdot 0,5145 = 0,457''$$

Dieser Abstand muss noch mit zwei multipliziert werden um den FWHM Wert zu erhalten : $\Rightarrow 0,915''$

$\rightarrow$ Für den 120/900 mm Equinox gilt somit : **FWHM = 0,915''**

Laut [1 / 15.4.1.1] sollte ein Pixel etwa 0,25 FWHM der PSF abdecken welche von dem Objektiv erzeugt wird. Daraus ergibt sich für den o.g. 120 mm ED-APO ein **optimaler Abbildungsmaßstab von 0,23"/Pixel**.

Mit der Primärbrennweite von 900 mm wird ein Abbildungsmaßstab von 0,86"/Pixel erreicht. Mit einer Brennweite von 3365 mm wird bei einer Öffnung von 120 mm der optimale Abbildungsmaßstab erreicht.

In der Praxis ist die Verwendung einer 2-fach bis 3-fach Barlow-Linse an dem 120 mm ED-APO für Doppelsternmessungen zu empfehlen bei 3,75 µm Pixelgröße.

→ Der Abbildungsmaßstab mit einer 3x Barlow-Linse : **0,29 ["/Pixel]**

→ Der Abbildungsmaßstab mit einer 2x Barlow-Linse : **0,43 ["/Pixel]**.

3.4 Trennbarkeit von Doppelstern-PSFs

Wenn Sterne dichter stehen als 2 x FWHM wird es schwierig, die Doppelsternparameter noch zuverlässig zu berechnen. Die üblichen Centroid-Algorithmen z.B. in AIP4Win bekommen dann Probleme, da eine klare Separation zw. beiden Komponenten resp. deren PSFs nicht mehr gegeben ist.

Für den 120 mm ED APO liegt die Grenze hier bei : $\alpha = 0,915 \cdot 2 = 1,83 \approx 1,8''$

→ Engere Doppelsterne können mit AIP4Win nicht mehr zuverlässig berechnet werden.

Laut [1 / 15.3] ist **REDUC** [12] die einzige Software, welche über die sog. „surface“ Routing in der Lage ist, noch engere Doppelsternpaare zuverlässig zu vermessen, insbesondere auch solche, deren PSF sich überlappen.

4 Messfehler bei Doppelsternmessungen

4.1 Einfluss der Fernrohrbrennweite auf die Messgenauigkeit

Die nominale Brennweite eines Fernrohres/Objektives wird vom Hersteller angegeben, z.B. 900 mm. Allerdings unterliegt diese Brennweite gewissen leider unbekannten Toleranzen, d.h. die tatsächliche Brennweite wird i.d.R. mehr oder weniger abweichen von der nominalen Brennweite. Nach der Gleichung im vorherigen Kapitel ergibt sich dadurch ein systematischer Messfehler.

Am Beispiel einer nominalen Brennweite von 900 mm und tatsächlichen angenommenen Brennweiten zw. 870..930 mm soll hier exemplarisch anhand der Gleichung oben der Messfehler ermittelt werden anhand eines Doppelsterns mit 10" Abstand für die ZWO ASI 120MC-S:

Tatsächliche Brennweite [mm]	Abbildungsmaßstab ["/Pixel]	Gemessener Abstand	Abweichung zum tatsächlichen Abstand von 10"
870	0,889	10,34"	+ 0,34"
880	0,879	10,23"	+ 0,23"
890	0,869	10,11"	+ 0,11"
900	0,859	10,0"	0"
910	0,850	9,89"	- 0,11"
920	0,841	9,79"	- 0,21"
930	0,832	9,68"	- 0,32"

– Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der Brennweite –

Aus der Betrachtung oben ist sofort ersichtlich, dass die Genauigkeit der Bestimmung der tatsächlichen Brennweite und somit des Abbildungsmaßstabes essenziell ist für die erreichbare Messgenauigkeit.

4.2 Exakte Brennweitenermittlung eines Refraktors

Bei Fernrohren resp. Objektiven sind die genannten Brennweiten nominale Nenn-Brennweiten (Herstellerangaben). Bei der Herstellung von Objektiven gibt es Toleranzen, und die tatsächliche Brennweite eines Objektives kann/wird i. d. R. etwas von der nominalen Brennweite abweichen. Diese Abweichungen von der nominalen Brennweite führen einen schwer kalkulierbaren Messfehler ein.

Sinnvoll ist es daher, bei präzisen Doppelstern-Messungen die exakte Brennweite des verwendeten Objektives vorab zu ermitteln. Kann diese z.B. bei dem 120/900 ED-APO auf ± 5 mm genau ermittelt werden, ist der resultierende Messfehler bei Doppelsternen bis ~30" Abstand ausreichend.

4.3 Bessel-Methode

Vergleichende Untersuchungen [7] haben gezeigt, dass die Ermittlung der exakten Brennweite eines Refraktors am einfachsten und auch relativ genau nach der Methode von Bessel [8] erfolgen kann. Bei akkurater Durchführung kann hier die Brennweite mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern ermittelt werden.

Einschränkend muss hier allerdings gesagt werden, dass dies streng genommen nur für ‚dünne‘ Linsen gilt. Bei Teleskop-Objektiven ergibt sich aufgrund der Linsendicke mit der u.g. Formel eine zu hohe Brennweite. Die Abweichung liegt bei $\geq +1\%$ der Nennbrennweite.

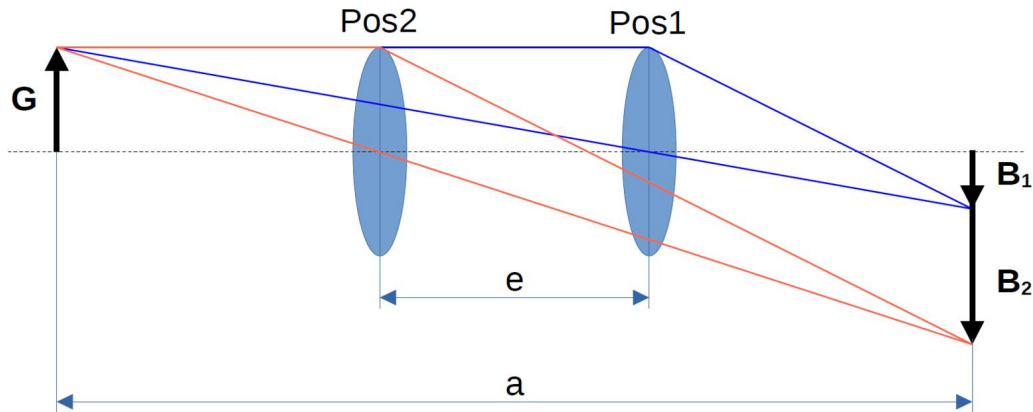


Abbildung 4: Bessel Methode zur Messung der Brennweite eines Objektivs

Bei der Bessel-Methode wird ein Gegenstand **G** durch ein Objektiv abgebildet. Dabei gibt es zwei mögliche Objektiv-Positionen (**Pos1** und **Pos2**) wo der Gegenstand scharf abgebildet wird, **B1** (kleiner) und **B2** (größer). Um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen, sollte der Abstand ,a' zwischen Gegenstand und Bild mindestens die vierfache Brennweite des Objektivs sein.

Der Gegenstand **G** kann dabei eine helle Lampe sein, welche hinter dem Okularauszug positioniert wird. Gegenüber dem Objektiv befindet sich eine Leinwand oder auch einfach eine weiße Wand, auf die das Bild der Lampe projiziert wird.

Nun wird das Objektiv so lange bewegt, bis ein kleines, scharfes Bild auf der Leinwand sichtbar wird. Der Abstand der Leinwand zur Objektivoberfläche wird gemessen (e_1). Nun wird das Objektiv weiter in Richtung Gegenstand/Lampe bewegt. An einer bestimmten Position erscheint nun ein großes, schwächeres und scharfes Bild des Gegenstandes/Lampe. Der Abstand zur Leinwand wird erneut gemessen (e_2). Der Abstand zwischen den beiden Objektivpositionen ergibt sich nun zu $e = |e_2 - e_1|$.

Die Brennweite des Objektivs errechnet sich dann wie folgt :

$$f = \frac{a^2 - e^2}{4 \cdot a} \quad a \geq 4 \cdot f$$

Werden die Abstandsmessungen ausreichend präzise durchgeführt, kann die Brennweite des Objektivs mit einer recht hohen Genauigkeit von einigen Millimetern ermittelt werden.

4.3.1 Brennweitenermittlung beim SW Equinox nach Bessel

In mehreren Messungen nach Bessel wie oben beschrieben wurde die Brennweite des SW Equinox 120/900 mm zu $\rightarrow 910 \text{ mm } (\pm 2 \text{ mm})$ ermittelt.

Allerdings ist die ermittelte Brennweite oben etwa 1% zu hoch aufgrund der nicht betrachteten geometrischen Dicke der Objektivlinse(n) HH' des Equinox. Unter der (realistischen) Annahme einer Objektivdicke $HH' = 30..40 \text{ mm}$ errechnet sich die tatsächliche Brennweite des Equinox zu :

$$f = \frac{(a - HH')^2 - e^2}{4 \cdot (a - HH')} \quad a \geq 4 \cdot f$$

Unter Annahme einer optischen Dicke von 30 .. 40 mm ergibt sich die Brennweite des SW Equinox 120/900 nach Bessel zu $\rightarrow 900 \text{ mm } (\pm 5 \text{ mm})$

Sobald die geometrische Dicke des Objektivs nicht exakt bestimmt werden kann, empfiehlt sich eine genauere Ermittlung der Brennweite z.B. mittels des Baader Microguide Okulars.

4.4 Brennweitenermittlung mittels Baader Microguide Okular

In 5..10 Durchgängen wurde die durchschnittliche Durchlaufzeit der linearen Skala des Microguide Okulares ermittelt. Die Skala hat dabei eine Länge von exakt 6 mm. Ermittelt wurde die Primärbrennweite als auch mit 2x APO Barlow (TSSHORTY). Die Brennweite errechnet sich dabei anhand der Durchlaufzeit (t) in Abhängigkeit der Deklination des Mess-Sterns.

$$f = \frac{82281}{t \cdot \cos(\delta)} \quad t - \text{Durchlaufzeit [s] der 6 mm im Microguide (60 ST)} \quad / \quad \delta - \text{Deklination des Mess-Sterns}$$

Herleitung :

Gesichtsfeld in Bogensekunden : $\alpha = 15,0411 \cdot t \cdot \cos(\delta)$ t – Durchlaufzeit [s] δ – Deklination

Abbildungsmaßstab für 6 mm : $f = \frac{206265 \cdot 6 \text{ mm}}{\alpha}$

Brennweite : $f = \frac{206265 \cdot 6 \text{ mm}}{15,0411 \cdot t \cdot \cos(\delta)} = \frac{82281}{t \cdot \cos(\delta)}$

4.4.1 Equinox 120/900 : ϵ Orionis (-1,18°)

$n = 5$ $\bar{t} = 91,31$ [s] $\sigma_{\text{tn}} = 0,0864$ $2\sigma_{\text{tn}} = 0,0965$

Primärbrennweite : $f = \frac{82281}{91,31 \cdot \cos(-1,18^\circ)} = \underline{\underline{901,3 \text{ mm}}} \quad [\pm 1 \text{ mm}] \quad (\pm 0,1 \text{ Sekunden})$

$n = 10$ $\bar{t} = 44,15$ [s] $\sigma_{\text{tn}} = 0,1006$ $2\sigma_{\text{tn}} = 0,1061$

Mit 2x APO Barlow : $f = \frac{82281}{44,15 \cdot \cos(-1,18^\circ)} = \underline{\underline{1864,1 \text{ mm}}} \quad [\pm 4,2 \text{ mm}] \quad (\pm 0,1 \text{ Sekunden})$

→ **Barlow Faktor = 2,068**

Leider verändert sich bei Verwendung einer Barlow-Linse und Kamera sehr geringfügig die optische Konfiguration und damit die Brennweite was zu einer Abweichung von dem oben berechneten Wert führt. Diese wurde mittels eines Referenz-Doppelsterns bei Verwendung der TSSHORTY 2x Barlow und der ZWO ASI 120MC-S bestimmt zu **f=1901,3 mm** (5704 mm bei 3x drizzle).

Für die Verwendung im Primärfokus ergeben sich folgende Abbildungsmaßstäbe für einen 3,75 µm Sensor :

Zeit [s]	Brennweite f [mm]	Abbildungsmaßstab ["/pixel]	$\Delta\alpha$ ["/pixel]
91,3964	900,4561755	0,859002105	+ 0,000812043
91,31	901,3082116	0,858190062	
91,2236	902,1618616	0,857378019	- 0,000812043

Für die Verwendung der 2x Barlow (TSSHORTY TSOptics 1,25" 2x-APO-Barlowlinse, 3-elementig) ergeben sich folgende Abbildungsmaßstäbe für einen 3,75 µm Sensor :

Zeit [s]	Brennweite f [mm]	Abbildungsmaßstab ["/pixel]	$\Delta\alpha$ ["/pixel]
44,2506	1859,826823	0,415895577	+ 0,000945503
44,15	1864,064616	0,414950074	
44,0494	1868,321766	0,41400457	- 0,000945503

→ Der plate-scale Fehler beträgt in beiden Fällen → $\Delta\alpha \sim \pm 0,001$ ["/pixel]

Bei einer max. Abweichung/Fehler von $\sim 0,001$ "/Pixel für die beiden Extremwerte und einer angestrebten Messgenauigkeit von $\pm 0,1''$ dürfen die Komponenten eines Doppelsterns nun max. $\sim 100''$ Abstand voneinander haben, ansonsten kann der Messfehler größer als $0,1''$ werden.

4.4.2 Williams 80/545 : ϵ Orionis ($-1,18^\circ$)

Primärbrennweite : $f = \frac{82281}{150,3 \cdot \cos(-1,18^\circ)} = 547,6 [mm] \quad [\pm 1,5 mm] \quad (\pm 0,33 \text{ Sekunden})$

Mit 2x APO Barlow : $f = \frac{82281}{72,6 \cdot \cos(-1,18^\circ)} = 1133,6 [mm] \quad [\pm 5 mm] \quad (\pm 0,33 \text{ Sekunden})$

→ Barlow Faktor = 2,070

4.5 Brennweitenermittlung anhand eines Referenz-Doppelsterns

Grundsätzlich kann mit der Formel nach (3.2) auch die effektive Brennweite des optischen Systems selbst ermittelt werden. Benötigt werden dazu der Abstand ρ eines Referenz-Doppelsternes mit exakt bekannter Separation, der gemessene Abstand der beiden Komponenten in Pixel und die Pixelgröße des Detektors :

$$f = \frac{P_{\text{cou}} \cdot P_s \cdot 206,265}{\rho} \quad f - \text{Brennweite in [mm]}$$

- ρ – Abstand in Bogensekunden des Referenzdoppelstern
- P_{cou} – Anzahl Pixel zwischen den beiden Komponenten z.B. aus AIP4Win
- P_s – Pixelgröße in [µm] des verwendeten Chips

Beispiel STF 1744 : $P_{\text{cou}} = 50,71$ Pixel aus AIP4Win, $P_s = 3,75 \mu\text{m}$, $\rho = 14,5''$, 3x drizzle in AutoStakkert!

$$f = \frac{50,71 \text{ Pixel} \cdot 3,75 \mu\text{m} \cdot 206,265}{14,5''} = 2705 [mm] \quad : \text{ aufgrund 3x drizzle} \rightarrow \text{Brennweite} = 902 [mm]$$

4.6 Atmosphärische Refraktion

Die atmosphärische Refraktion betrifft grundsätzlich beide/alle Doppelstern-Komponenten gleichermaßen bzw. sehr ähnlich aufgrund der Nähe der Komponenten. Tatsächlich gibt es auch noch eine differenzielle atmosphärische Refraktion. Wenn beide Komponenten vertikal zueinander stehen, ist die tiefere Komponente mehr von der atmosphärischen Refraktion betroffen als die etwas höhere. Allerdings kann der Effekt vernachlässigt werden, wenn der Doppelstern höher als 30° am Himmel steht. Die differentielle Refraktion zwischen den Komponenten ist dann laut [1] $\leq 0,1''$.

4.7 Seeing

Das Seeing hat ebenfalls Auswirkungen auf den Abstand der Komponenten, da die Komponenten je nach Abstand und verwendeten Teleskop unterschiedlichen Seeing-Einflüssen unterliegen können. Dadurch kann der Abstand und/oder der Positionswinkel schwanken. Allerdings wird dieser Effekt bei länger belichteten Aufnahmen ausgemittelt und verschwindet dadurch fast vollständig. Bei einer Belichtungszeit von mehr als ein paar Sekunden resp. beim Stacken entsprechend vieler kürzer belichteter Aufnahmen reduziert sich dieser Fehler empirisch ermittelt auf ebenfalls $\leq 0,1''$.

4.8 Atmosphärische Dispersion

Die atmosphärische Dispersion ist die wellenlängenabhängige atmosphärische Refraktion von (Sternen)Licht. Diese kann je nach Zenitstand des Doppelsterns einen beträchtlichen Fehler einführen. In [1] wurde beispielhaft ein Doppelstern-Paar beschrieben, bestehend aus einem jeweils monochromatischen roten und einer blauen Komponente mit 50° Abstand vom Zenit. Der in diesem Fall durch die atmosphärische Refraktion eingeführte Messfehler liegt bei $\pm 0,5''$.. $1,5''$, also ein beträchtlicher Fehler bei einer angestrebten Messgenauigkeit von $\sim 0,1''$.

Dieser Effekt wird zu einem Teil ausgemittelt durch die Tatsache, dass Sterne i.d.R. nie nur im roten resp. blauen Licht emittieren, sondern immer ein kontinuierliches Spektrum aussenden. Ganz umgangen kann dieser Effekt aber nur durch Vermessen von Doppelsternen, wenn diese sich nahe dem Zenit befinden, resp. durch den Einsatz von Filtern. Die besten Ergebnisse werden hier mit schmalbandigen Filtern erreicht, die nur einen kleinen Ausschnitt des Spektrums passieren lassen, allerdings mit dem Nachteil, dass Licht anderer Wellenlängen verloren geht und somit länger belichtet werden muss.

4.9 Systematischer Fehler in AIP4Win

Das weiter unten gezeigte Kalibrierungsbild von Mizar wurde insgesamt 10 x mit AIP4Win unter identischen Bedingungen ausgemessen, um den systematischen Fehler von AIP4Win für diese Konfiguration zu ermitteln.

```
AIP4Win v.2.4.10 Distance Tool
Date / Time: 2022-06-15 / 21:52:10
No plate solution available for this image.
Output values based on user input values.
User supplied focal length: 910
User supplied parallactic angle: 0.000 deg
User supplied pixel width: 0,00375 mm
User supplied pixel height: 0,00375 mm
```

Für die gemessenen Abstände und Positionswinkel wurden die Standardabweichungen ermittelt :

$$\sigma_\theta = 0,023'' \quad \sigma_p = 0,0061^\circ$$

→ Der Messfehler eingeführt durch AIP4Win ist erheblich geringer als die angestrebte Messgenauigkeit von $\pm 0,1''$. Somit ergibt sich eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messungen.

4.10 Bildfeldkrümmung

Ein weiterer Faktor der Einfluss auf die Messgenauigkeit haben kann, ist eine mögliche Bildfeldkrümmung bzw. generelle Abbildungsfehler der verwendeten Optik, die den Abbildungsmaßstab beeinflussen können. Diese müssen und können nur empirisch ermittelt werden.

Dazu wird ein Referenz-Doppelstern an mindestens drei unterschiedlichen Orten im Detektor positioniert und vermessen, z.B. in der Mitte des Detektors und in zwei unterschiedlichen Ecken. Anschließend werden jeweils die Separation und der Positionswinkel ermittelt und miteinander verglichen.

Einflüsse aufgrund von Abbildungsfehler der verwendeten Optik sollten so vorhanden mit dieser Messung sichtbar werden.

4.11 Polar Alignment

Die exakte resp. nicht exakte Ausrichtung der parallaktischen Montierung auf dem Himmels-Nordpol führt zu Bildfeldrotation und hat somit Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen des Positionswinkels von Doppelsternen. Dieser Einfluss ist umso höher, je dichter der Doppelstern dem Himmels-Nordpol ist und je ungenauer das Polar Alignment ist und kann im Extremfall zu Abweichungen von mehreren Graden beim Positionswinkel führen.

Diesem Fehler kann man durch folgende Maßnahmen entgegenwirken:

- Möglichst exaktes Polar Alignment
- Der/die Referenz-Doppelsterne sollten nahe den zu messenden Doppelsternen sein

4.12 Standardabweichung

Ein kurzer Ausflug in die Statistik. Um den Fehler einer Messung beurteilen zu können, sind die Ermittlung der Standardabweichung (σ) und der Varianz (2σ) wichtige Mittel, da sie die Streuung der Messwerte um den Mittelwert μ zeigen, vorausgesetzt wird hier, dass die Messwerte einer Normalverteilung folgen.

Die Standardabweichung ($\pm \sigma$) definiert einen Bereich, wo 68,2% der Messwerte liegen, vorausgesetzt die Messwerte folgen der unten gezeigten Normalverteilung. Die Varianz ($\pm 2\sigma$) ist das Quadrat der Standardabweichung, in ihrem Bereich liegen 95,4%.

Die Ermittlung von Standardabweichung und Varianz macht nur bei einer ausreichend großen Stichprobe wirklich Sinn, mindestens 10 Messungen sollten vorliegen, mehr ist besser.

Die Berechnung der Standardabweichung kann mit jedem besseren Taschenrechner erfolgen oder auch mit Excel oder LibreOffice.

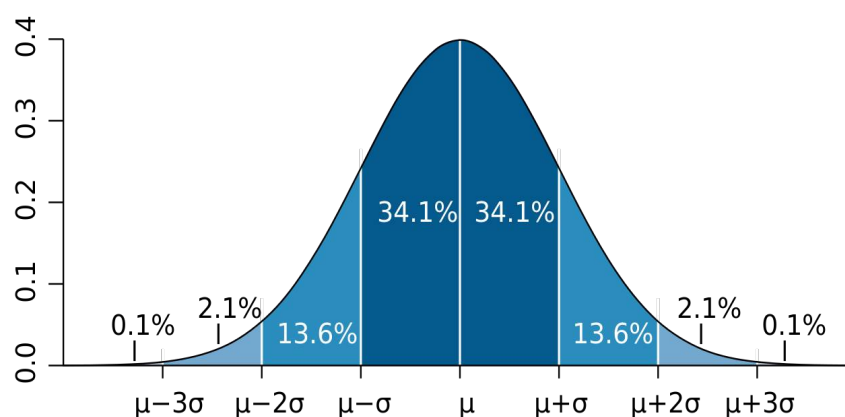


Abbildung 5: Verteilung von Messwerten - Quelle : [6]

5 Baader Micro-Guide Messokular

Das Micro-Guide Okular der Firma Baader Planetarium ist ein spezielles beleuchtetes Messokular mit 12,5 [mm] Brennweite, welches leider nur noch auf dem Gebrauchtmarkt erworben werden kann. Verschiedene Skalen dienen zur Bestimmung von Abständen und Positionswinkeln. Die erreichbare Genauigkeit ist primär abhängig von der Brennweite des Teleskops und somit von der erreichten Vergrößerung. Laut [5] können im Vergleich mittels CCD oder CMOS-Kameras mittlerweile höhere Genauigkeiten erreicht werden. Sehr vorteilhaft aber kann das Micro-Guide Okular zum Beispiel eingesetzt werden zur exakten Bestimmung der Brennweite des Teleskops, siehe auch Kapitel 4.4. Die Genauigkeit der Brennweitenbestimmung über das Micro-Guide Okular ist hierbei höher als über die Bessel-Methode und hat mindestens die gleiche Genauigkeit wie bei Verwendung eines Beugungsgitters [15].

5.1 Baader Micro-Guide Messokular Skalen

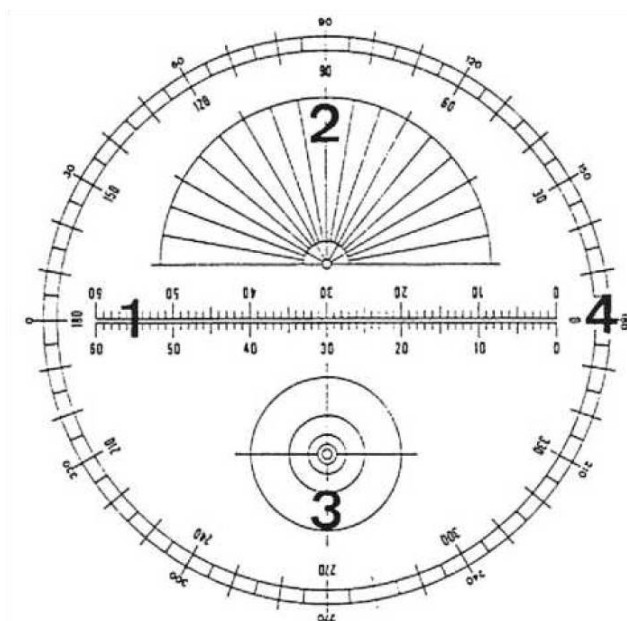


Abbildung 6: Baader Micro-Guide Messokular
- Abbildung mit freundlicher Genehmigung
© Baader Planetarium GmbH

(1) Lineare Skala

- 6 mm lang, 60 Skalenteile
- Ein Skalenteil (ST) = 100 μm
- Abstand der Doppellinie = 50 μm (Mitte - Mitte)
 - Der freie Abstand dazwischen ca. 35 μm .

(2) Positionswinkelskala

- Durchmesser des zentralen Kreises = 100 μm

(3) Konzentrische Kreise

- Diese Kreise besitzen Durchmesser von:
 - 125, 250, 500, 1000 und 2000 μm

(4) Große Winkelskala

- Die großen (inneren) Maßzahlen verlaufen im Richtungssinn des Positionswinkels bei der Beobachtung im astronomischen Fernrohr,
- Die kleineren (äußeren) Maßzahlen verlaufen im Richtungssinn des Positionswinkels bei zusätzlicher Verwendung eines **Zenit-Spiegels**

→ Eine detaillierte Anleitung zum Baader Micro-Guide Messokular ist verfügbar unter [16].

5.2 Baader Micro-Guide Messokular Abbildungsmaßstab

Gesichtsfeld in Bogensekunden :

$$\alpha = 15,0411 \cdot t \cdot \cos(\delta)$$

α - Gesichtsfeld in Bogensekunden

t – Durchlaufzeit

δ – Deklination

Abbildungsmaßstab Skalenteil :

$$\alpha_{ST} = \frac{20626,5}{f}$$

Mit 1 ST = 0,1 mm = 100 μm

f – Brennweite in [mm]

α – Bogensekunden ["/ST]

Berechnung der Objektgröße :

$$\alpha = \frac{206265 \cdot D}{E}$$

 α - Winkel in Bogensekunden

D – Durchmesser/Größe in [Km]

E – Entfernung in [Km]

5.3 Abbildungsmaßstab für Equinox 120/900

F [mm]	V	ST ₁	DL ₁	FA _{DL-1}	Kreis ₂	K1	K2	K3	K4	K5
901 (Primär)	71 x	22,9"	11,45"	8,0"	22,9"	28,6"	57,2"	114,5" 1' 54,5"	229" 3' 49"	458" 7' 38"
1864 (2x Barlow)	149 x	11,07"	5,53"	3,9"	11,07"	13,8"	27,7"	55,3"	111" 1' 51"	221" 3' 41"

ST₁ : Skala 1 - Ein SkalenteilDL₁ : Skala 1 - Abstand der Doppellinie (Mitte - Mitte)FA_{DL-1} : Skala 1 - Der freie Abstand zwischen der DoppellinieKreis₂ : Skala 2 - Zentrale Kreis

K1 : Skala 3 - Innerer Kreis

K4 : Skala 3 - Zwischen-Kreis

K2 : Skala 3 – Zwischen-Kreis

K5 : Skala 3 – Äußerer Kreis

K3 : Skala 3 - Zwischen-Kreis

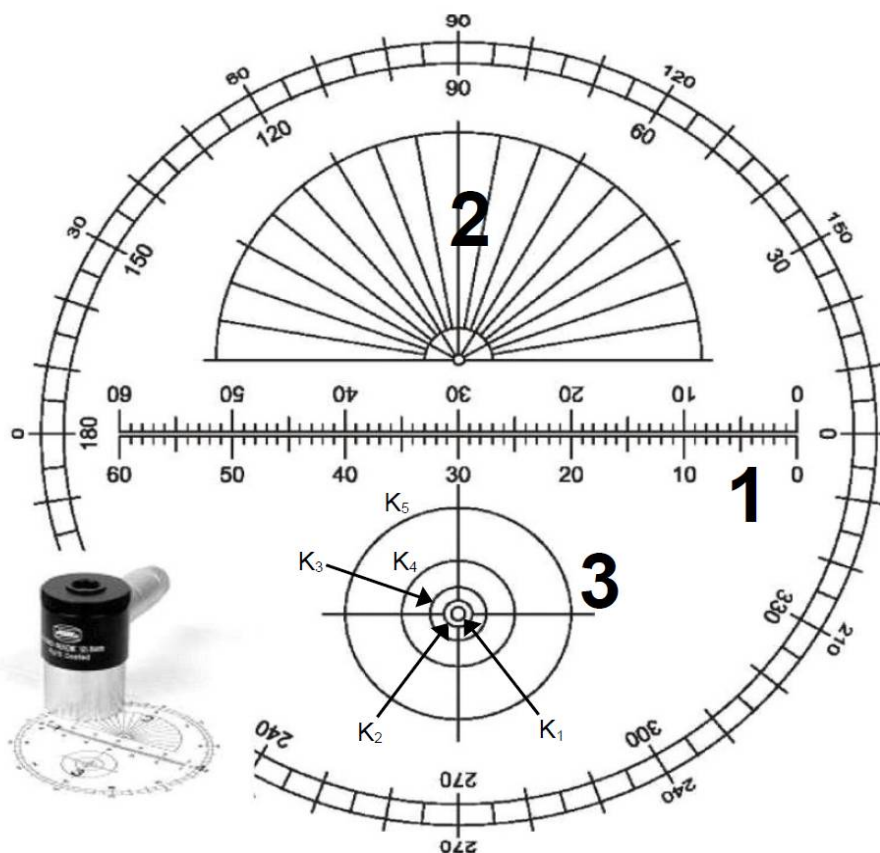


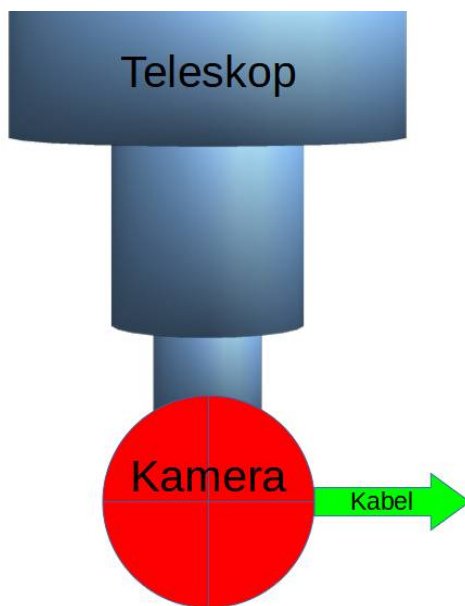
Abbildung 7: Baader Micro-Guide – Abbildungsmaßstab
 - Abbildung mit freundlicher Genehmigung
 © Baader Planetarium GmbH

6 Kalibrierung des Messsystems

Das Messsystem bestehend aus Teleskop, optischen Zusatzkomponenten, Detektor und der Montierung muss kalibriert werden. Hierzu werden in der Literatur verschiedene Verfahren empfohlen [1]. Neben der exakten Ermittlung der Brennweite ist eine Variante die Kalibrierung anhand bereits exakt vermessener Doppelsterne, wo bereits nachgewiesen wurde, dass sich weder Abstand noch Positionswinkel im Verlauf der Jahre relevant ändern resp. die genauen Abstände und Positionswinkel für verschiedene Jahre bekannt sind. Diese Art der Kalibrierung mittels Referenz-Doppelsterne wird im Folgenden beschrieben.

6.1 Kamera-Ausrichtung & Software-Konfiguration

Abbildung 8: Blick von oben auf die ZWO ASI



Die Verwendung einer parallaktischen Montierung, einer geeigneten Kameraausrichtung am Okularauszug und Einstellung in der Aufnahme-Software erleichtern die spätere Auswertung der Ergebnisse. Die ZWO ASI 120MC-S sollte hierbei wie rechts im Bild im Okularauszug ausgerichtet werden.

→ Bei dieser Ausrichtung wird das Kabel im Winkel von etwa 90° weggeführt.

Zu beachten ist, dass ein 90° Zenitspiegel Verwendung findet, auch um ohne Verlängerungshülse den Fokus zu erreichen.

Durch diese Anordnung werden aufrichtige, aber seitenverkehrte Bilder vom Detektor aufgenommen.

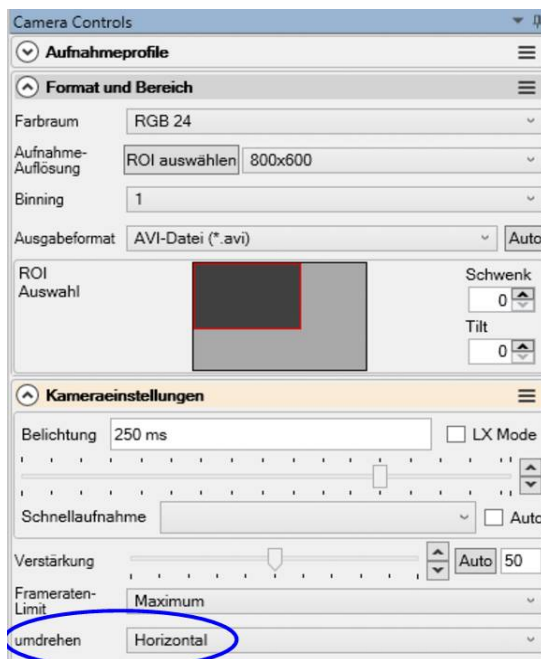


Abbildung 9: SharpCap Einstellungen

Zur Aufnahme wird die Software **SharpCap** verwendet.

Einstellungen :

- Farbraum : RGB 24
- Auflösung : 800x600 (Volumen-Reduktion)
- Binning : 1
- Ausgabeformat : AVI
- Belichtung : dyn.
- Verstärkung : dyn.
-
- Frameraten-Limit: Maximum

- umdrehen

Um die seitenverkehrte Darstellung aufgrund des Zenitspiegels zu kompensieren, sollte in SharpCap der Konfigurations-Parameter *umdrehen* auf *Horizontal* gesetzt werden. Dadurch wird ein seitenrichtiges und aufrechtes Bild erzeugt, mit grundsätzlich korrekter Ausrichtung der Himmelsrichtungen.

6.2 Kalibrierungs-Doppelsterne

Stern		RA	Dec	Helligkeit		Abstand	Pos-Winkel	SRC
				A	B			
ζ Lyr	Zeta 1 - STFA 38 WDS 18448+3736	18h 44m 46.36s	+37° 36' 18.4"	4,34	5,62	43,75" (G)	150,4°	SD
24 Com	WDS 12351+1823 STF1657	12h 35.1m	+18° 23'	5,0	6,6	20,15" (G)	270,3 (fix) 271,8 (SD)	
ζ Uma (Mizar)	WDS 13239+5456 STF1744	13h 23.9m	+54° 56'	2,2	3,9	14,44" (G)	152,8 (2022)	G
16 Cyg	WDS 19418+5032 STFA 46	19h 41.8m	+50° 32'	6,0	6,23	39,56" (G)	133 (2022)	SD
V711 Tau	WDS 03368+0035 STF422	03h 36m 47.30s	+00° 35' 15.9"	6,0	8,9	6.70" (G)	274.5° (2022)	SD
	WDS 09144+5241 STF1321	09h 14m 22.79s	+52° 41' 11.8"	7.79	7.88	16,97" (SD)	99,8° (2022)	SD
61 Cyg	WDS 21069+3845 STF2758	21h 06m 53.95s	+38° 44' 57.9"	5.20	6.05	30.73" (G)	153.6° (2022)	SD
Albireo	WDS 19307+2758 STFA 43 AB	19h 30m 43.29	+27° 57' 34.9"	3,19	4,68	34.58" (G)	54.0 ± 0.1	<u>JDSO</u>
Tau	WDS 03313+2734 STF 401	03h 31,3'	+27° 34'	6,6	6,9	11,42" (G)	269°	<u>SD</u>
Tau	WDS 05322+1703 STF 730	05h 32,2'	+17° 03'	6,1	6,4	9,67" (G)	142°	<u>SD</u>
Aur	WDS 06156+3609 STF 872	06h 15,7'	+36° 09'	6,9	7,4	11,39" (G)	216°	<u>SD</u>
20 Gem	WDS 06323+1747 STF 924AB	06h 32m	+17° 47'	6,3	6,9	19,89" (G)	211°	<u>SD</u>
ι Cnc	WDS 08467+2846 STF 1268	08h 46,7'	+28° 45,6'	4,13	5,99	31,3" (SD) 30,52" (G)	307°	<u>SD</u>
37 Her	WDS 16406+0413 STFA 31AB	16h 40,6'	+04° 13'	5,76	6,92	69,3" (SD)	229°	<u>SD</u>
100 Her	WDS 18078+2606 STF2280AB	18h 07,8'	23° 06'	5,81	5,84	14,3" (SD)	183°	<u>SD</u>

(G) – Daten von Aladin (Gaia)

(SD) Daten von stelledoppie

6.3 Richtlinien für die Auswahl von Referenz-Doppelsternen

Laut [1 / 15.7.2] sollte die Separation von Referenz-Doppelsternen mindestens 10 x FWHM betragen was für den 120/900 Equinox bedeutet, dass die Referenz-Doppelsterne einen Mindestabstand von 10" (10 * 0,915") haben sollten.

Laut [4.3.1] darf der maximale Abstand eines zu messenden Doppelsterns ~100" sein, bei Messung im Primärfokus und bei Verwendung einer Barlow, um den Messfehler unter 0,1" zu halten.

- ➔ Mindestabstand des Referenz-Doppelsternes : $\geq 10''$
- ➔ Maximalabstand des zu messenden Doppelsterns : $\leq 100''$

Abstand zu messende Doppelsterne	Idealer Abstand Referenz-Doppelstern
$< 2''$	N/A – Messung nicht möglich
$2'' \dots 25''$	$10'' \dots 20''$
$26'' \dots 55''$	$35'' \dots 45''$
$56'' \dots 100''$	$75''$
$> 101''$	$> 100''$

6.4 Kalibrierung am Beispiel von Mizar (STFA 1744)

Observation mit dem ED-APO 120/900 mm. Mit einem kalibrierten Wert für die Brennweite (**focal length**) von 2703 mm, ermittelt aus den Messungen mittels Baader Microguide Okular, wird der tatsächliche Abstand von 14,48" ermittelt. Die Verdreifachung der physikalischen Brennweite ist in der während der Bildverarbeitung verwendeten 3x Superresolution (3x drizzle) geschuldet. Daraus leitet sich die tatsächliche Brennweite zu 901,3 mm ab.

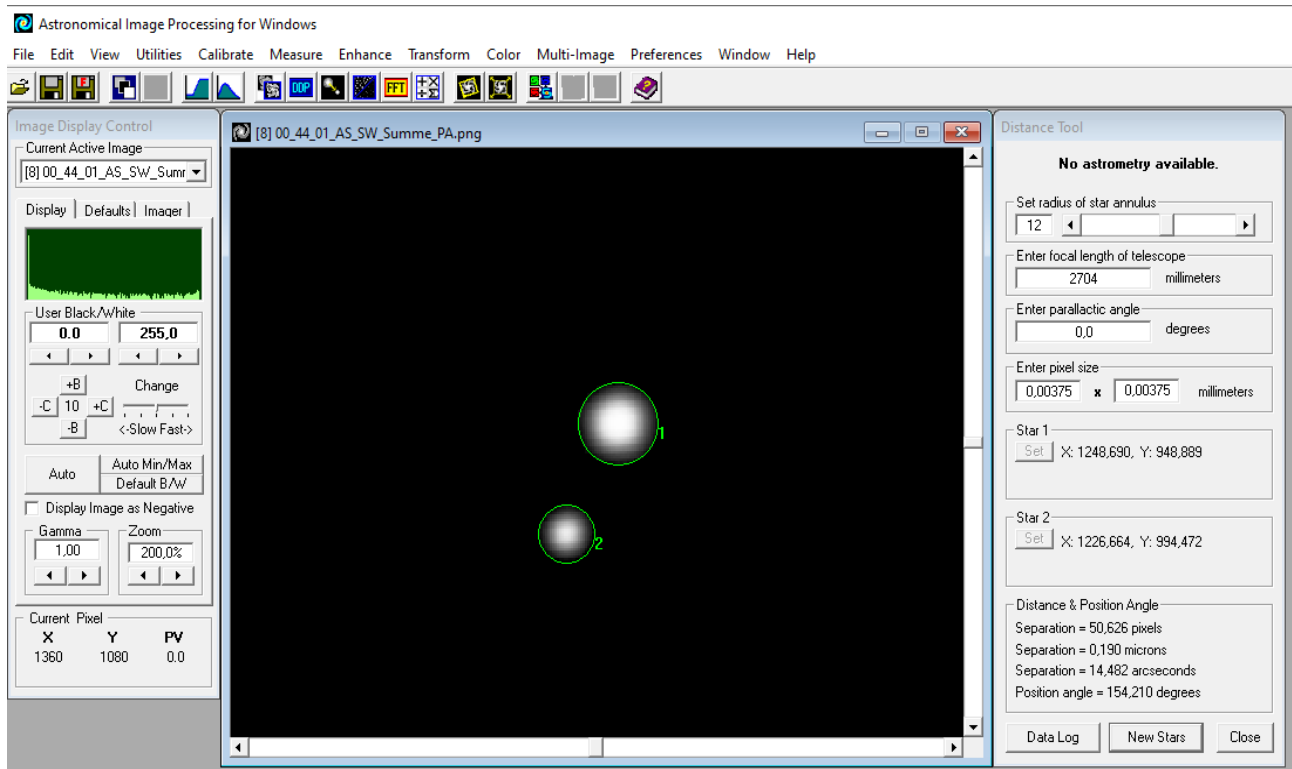


Abbildung 10: Kalibrierte Separation, kalibrierter Positionswinkel

Der **'parallactic angle'** in AIP4Win (Kalibrier-/Korrekturwinkel) von θ_K errechnet sich aus der Differenz des tatsächlichen PA von $\theta_{\text{Mizar}}=153,4^\circ$ abzüglich dem von AIP4Win gemessenen PA von θ_{AIP4Win} .

$$\theta_K = (\theta_{\text{Mizar}} - \theta_{\text{AIP4Win}})$$

Dieser Korrekturwinkel wäre bei exakt dieser und nur dieser Konfiguration/Mess-Kampagne anzuwenden auf weitere Doppelsterne, um den korrekten Positionswinkel zu ermitteln.

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich für das oben gewählte Mess-Setup die folgenden beiden Kalibrierungsfaktoren für AIP4Win:

$$f = 2704 \text{ mm}$$

$$\theta_K = 0^\circ \text{ (Bereits exakte Ausrichtung der Kamera im Okularauszug)}$$

7 Doppelsternmessungen - Datenreduktion

Nach der Erstellung von AVIs von Doppelsternen schließen sich mehrere Bearbeitungsschritte an, um zu den eigentlichen Messergebnissen zu gelangen. Abschließend können die Ergebnisse dann publiziert werden.

7.1 Stacking mit AutoStakkert!

Die aufgenommenen AVIs sollten aus mind. 100 Frames bestehen, um eine ausreichende Anzahl von Frames für das anschließende Stacking zu haben. Für das Stacking kommen verschiedene Programme infrage. Wichtig bei der Auswahl des Programms ist, dass es in der Lage ist, auch Sterne zu stacken. Ich verwende zum Stacken regelmäßig AutoStakkert3 [4].

AutoStakkert ist in der Lage auch engere Komponenten zu stacken, wobei auch dort Grenzen sind wenn die Komponenten zu eng stehen, siehe oben.

1) OPEN

Image Stabilization : Planet (COG) → zentriert auf die größte und hellste Gruppe Pixel

→ *Dynamic Background* selected

→ Breite und Höhe im Bild so klein wie möglich setzen um den Prozess zu beschleunigen

→ Einen *Alignment Point* definieren (Maus-Click auf DS)

Hinweis : *Surface* Stabilisierung wird für Mond und Sonne verwendet



Abbildung 11: AutoStakkert! - Konfiguration (I)

Quality Estimator : Laplace Δ → *Noise Robust* : 5 (default)

- Höheren Wert bei schlechten Seeing oder geringem Kontrast (Rauschen)
- Niedrigsten Wert (2) nur bei undersampled Bildern mit sehr hohem SNR Verhältnis

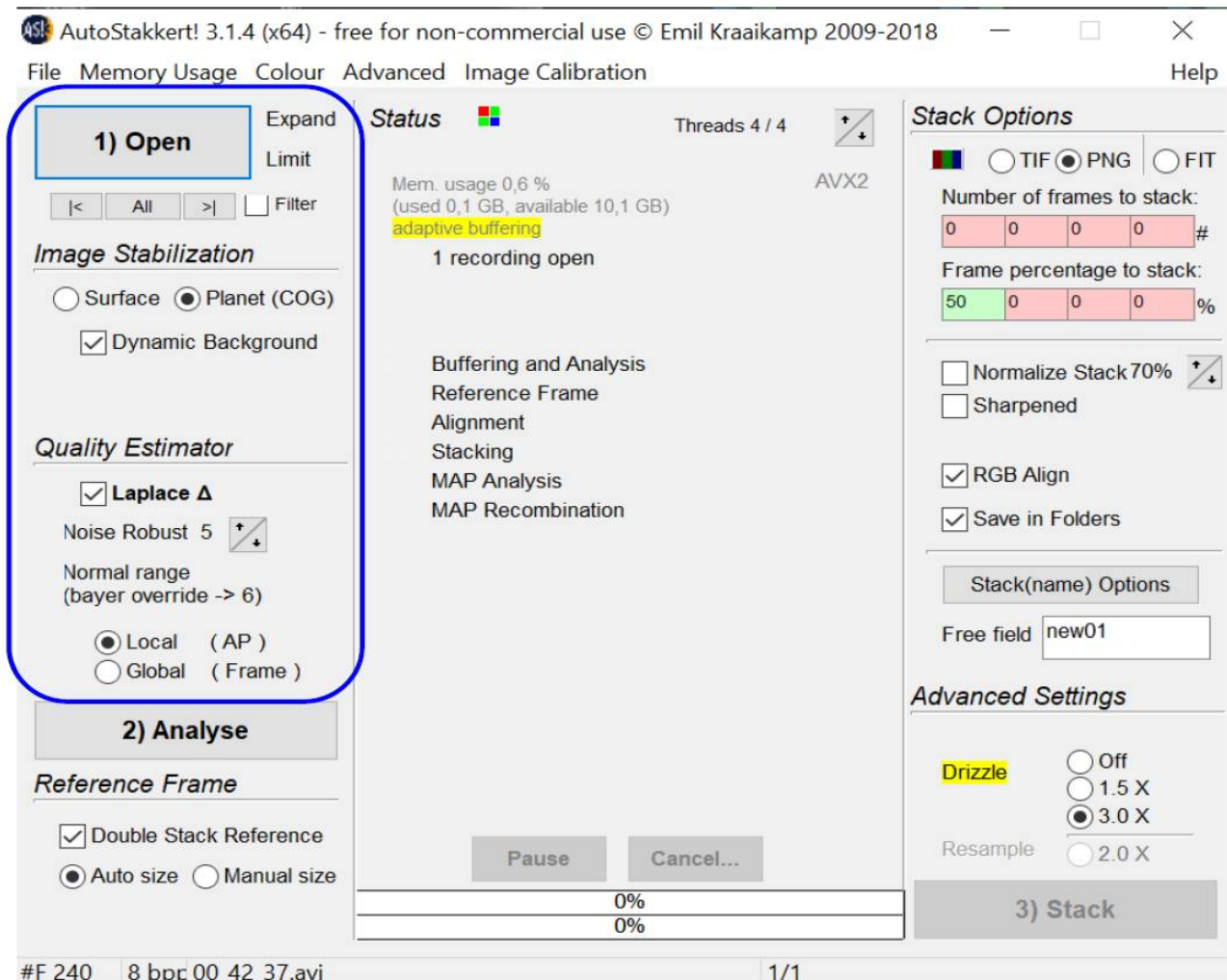
→ *Normal range*→ *Local (AP)* : Frame-Qualität wird um den Alignment Point herum bewertet

Abbildung 12: AutoStakkert! - Konfiguration (II)

2) Analyse

Durch Drücken von **2) Analyse** wird eine Qualitätsschätzung aller Frames durchgeführt und ein **Quality Graph** im Hauptfenster erstellt. Der Quality Graph zeigt die Frame-Qualität über die Zeit (graue Linie) und die Verteilung der nach Qualität sortierten Frames (grüne Linie), skaliert von ihren besten (oben links) zu ihren schlechtesten (unten rechts) Werten.

Der Quality Graph gibt einen Hinweis darauf, wie viele Frames man stacken sollte. Normalerweise kann alles unterhalb der horizontalen Qualitätslinie von 50 % beim Stacken ignoriert werden.

Durch Drücken von STRG+Rechtsklick in den Quality Graph an dem Punkt, an dem die Mehrheit der Frames unter der 50%-Linie liegt, kann man automatisch den entsprechenden Prozentsatz an Frames festlegen, die stacked werden sollen. An dieser Position erscheint im Quality Graph eine fette vertikale Linie, und der ausgewählte Prozentsatz wird in den **Stack Options** angezeigt.

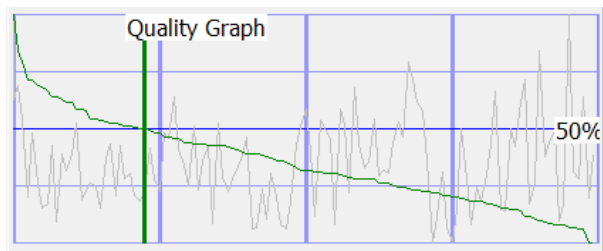


Abbildung 13: AutoStakkert! - Quality Graph

Stack Options

☒ TIF ☒ PNG ☐ FIT

Number of frames to stack:

0	0	0	0	#
---	---	---	---	---

Frame percentage to stack:

22	0	0	0	%
----	---	---	---	---

Reference Frame :

Reference Frame

☒ Double Stack Reference

☒ Auto size ☐ Manual size

Double Stack Reference

→ Double alignment and stacking

Auto size / Manual size

→ Auto size

Stack Options :

Stack Options

☒ TIF ☒ PNG ☐ FIT

Number of frames to stack:

0	0	0	0	#
---	---	---	---	---

Frame percentage to stack:

22	0	0	0	%
----	---	---	---	---

☐ Normalize Stack 70% ☐ Sharpened

☒ RGB Align

☒ Save in Folders

Stack(name) Options

Free field: new01

Advanced Settings

Drizzle ☐ Off ☐ 1.5 X ☒ 3.0 X

Resample ☐ 2.0 X

3) Stack

Output file format

→ TIF or PNG

Percentage of frames to be stacked

→ from Quality Graph

Normalize brightness of resulting stack

→ OFF

Also save sharpened pictures (for previewing)

→ OFF

Align RGB stack on subpixel level

→ for Color cam only

Dateiname des Summenbildes

Drizzle : HST Technik für undersampled Bilder um die Auflösung zu verbessern. **Drizzle = 3.0x**

Resample : Vergrößert das Bild über eine Bi-Kubische Interpolation

Abbildung 14:
AutoStakkert! - Stack
Options

3) Ergebnis

Unten α Her, Rasalgethi, 4.7", ohne weitere Nachbearbeitung



Abbildung 15: AutoStakkert! - α Her, Rasalgethi

8 Analyse der Messdaten

Für die Analyse und somit die Ermittlung von Separation und Positionswinkeln bieten sich verschiedene Programme an. Ich verwende aktuell AIP4Win. Aber auch über PlateSolve2 und Fitswork können diese Werte ermittelt werden, allerdings müssen diese dort manuell ermittelt und berechnet werden. Dies macht AIP4Win automatisch, daher beschränke ich mich hier auf die Beschreibung von AIP4Win.

8.1 Analyse mittels AIP4Win

Die Analyse über AIP4Win ist relativ einfach. Das Summenbild öffnen. Hier scheint AIP4Win leider kein TIFF zu verstehen, daher gehe ich aktuell noch über PNG-Files. Das geöffnete Bild ausreichend vergrößern (View → Zoom in) und anschließend das Distance-Tool von AIP4Win starten über Measure → Distance Tool. Folgende Daten müssen nun noch vorgegeben werden:

- Focal length : Dies ist die **kalibrierte** Brennweite des verwendeten Fernrohres, wobei die 3x Superresolution in AutoStakkert die Brennweite des Fernrohres verdreifacht.
- Par. Angle : Kalibrierungswinkel aus der Kalibrierungsmessung
- Pixel size : 0,00375 für die verwendete ZWO ASI 120MC-S (wichtig, Komma und kein Punkt)
- Star radius : Muss entsprechend des Doppelsterns für die Komponenten angepasst werden

Anschließend kann *Star 1* selektiert und dann *Star 2*. AIP4Win kalkuliert dann automatisch die Separation und den Positionswinkel.

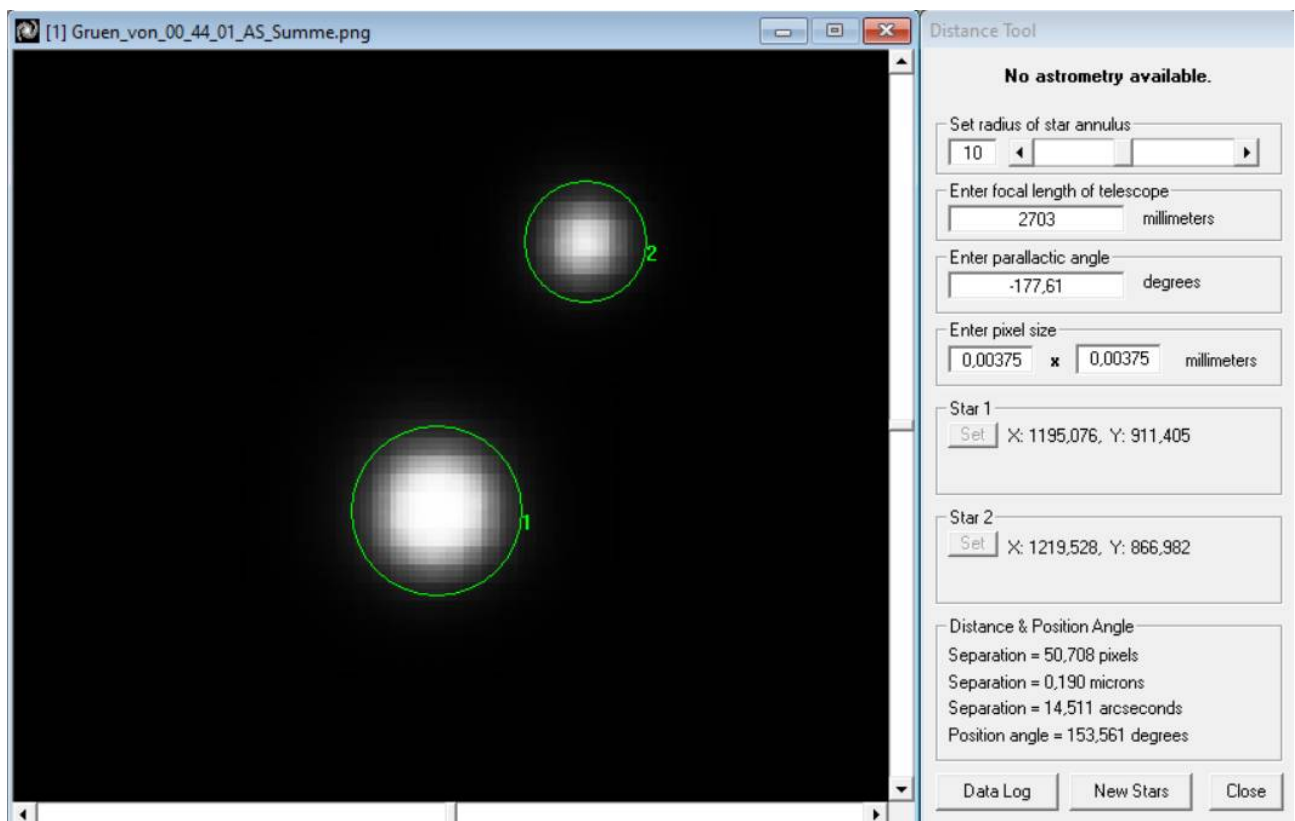


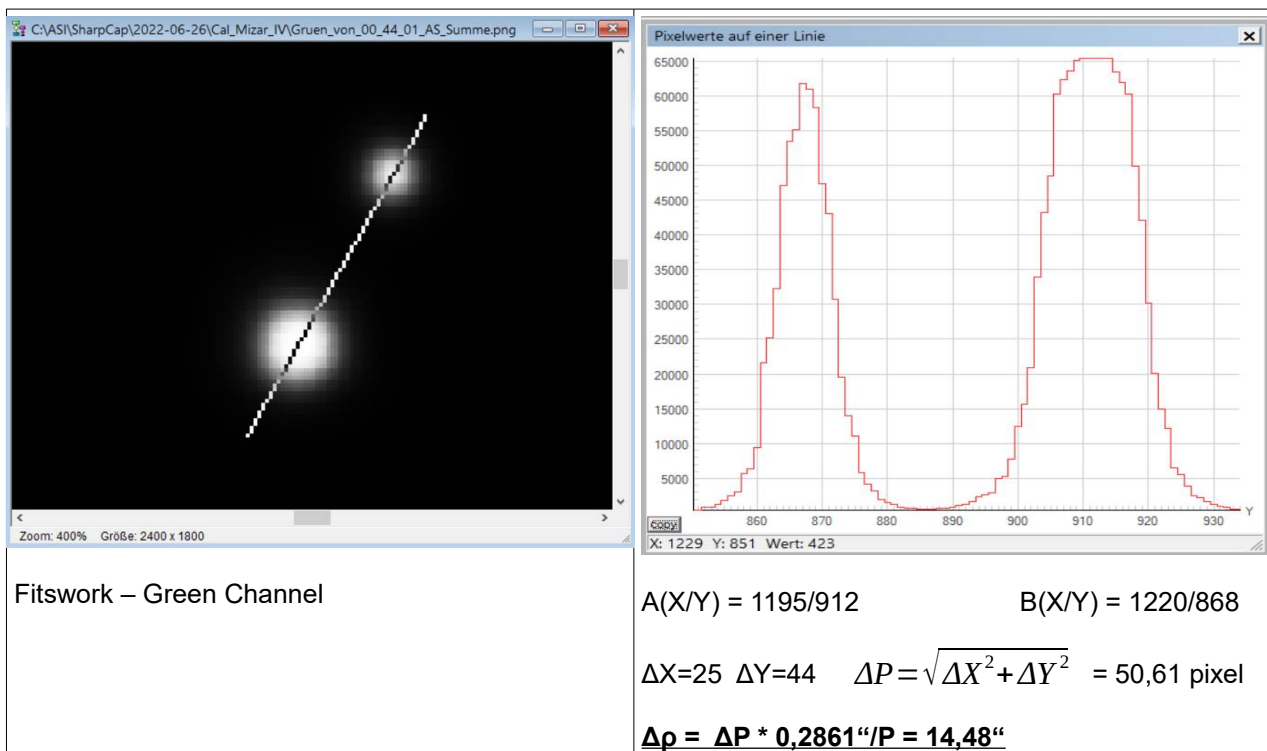
Abbildung 16: AIP4Win - Mizar - Kalibrierungsmessung

8.2 Analyse mittels Fitswork

Weitere interessante Analysen können auch mit Fitswork gemacht werden gerade, auch wenn die Komponenten so dicht sind, dass der Algorithmus von AIP4Win ins Straucheln gerät. Dazu muss in Fitswork unter **Bearbeiten** → **Weitere Funktionen** die Funktion **Pixellinie als Diagramm anzeigen** aufgerufen werden.

Nun kann eine Gerade durch die Mittelpunkte der Sterne gezogen werden und der Helligkeitsverlauf als Diagramm angezeigt werden. Per Mouse-Over können nun die exakten Pixel-Positionen der jeweiligen Peaks ermittelt werden und zu einer Abstandsbestimmung herangezogen werden.

Die Vorgehensweise zur Berechnung des Abstandes ist in dem Bild unten gezeigt. Sie erfolgt einfach durch Anwendung des Satzes vom Pythagoras (Dreiecks-Berechnung).



9 Beispiel für eine Messung - STF 1888

9.1.1 General Information

ID	Const.	Other Names	RA	DEC	m(A)	m(B)	SEP	PA	SRC
STF 1888	Boo	ξ /Xi Boo, WDS 14514+1906	14h 51,4'	+19° 06'	4,8	7,0	5,2"	294,3°	SD

Observer	Date	Time (UT)	Epoch	Location	Weather	Seeing	Transp.	Lunar Phase
HWI	25.06.2022	22:15	B2022.483	Igensdorf, Germany	20°C, clear	II	5	0.98

9.1.2 Equipment information

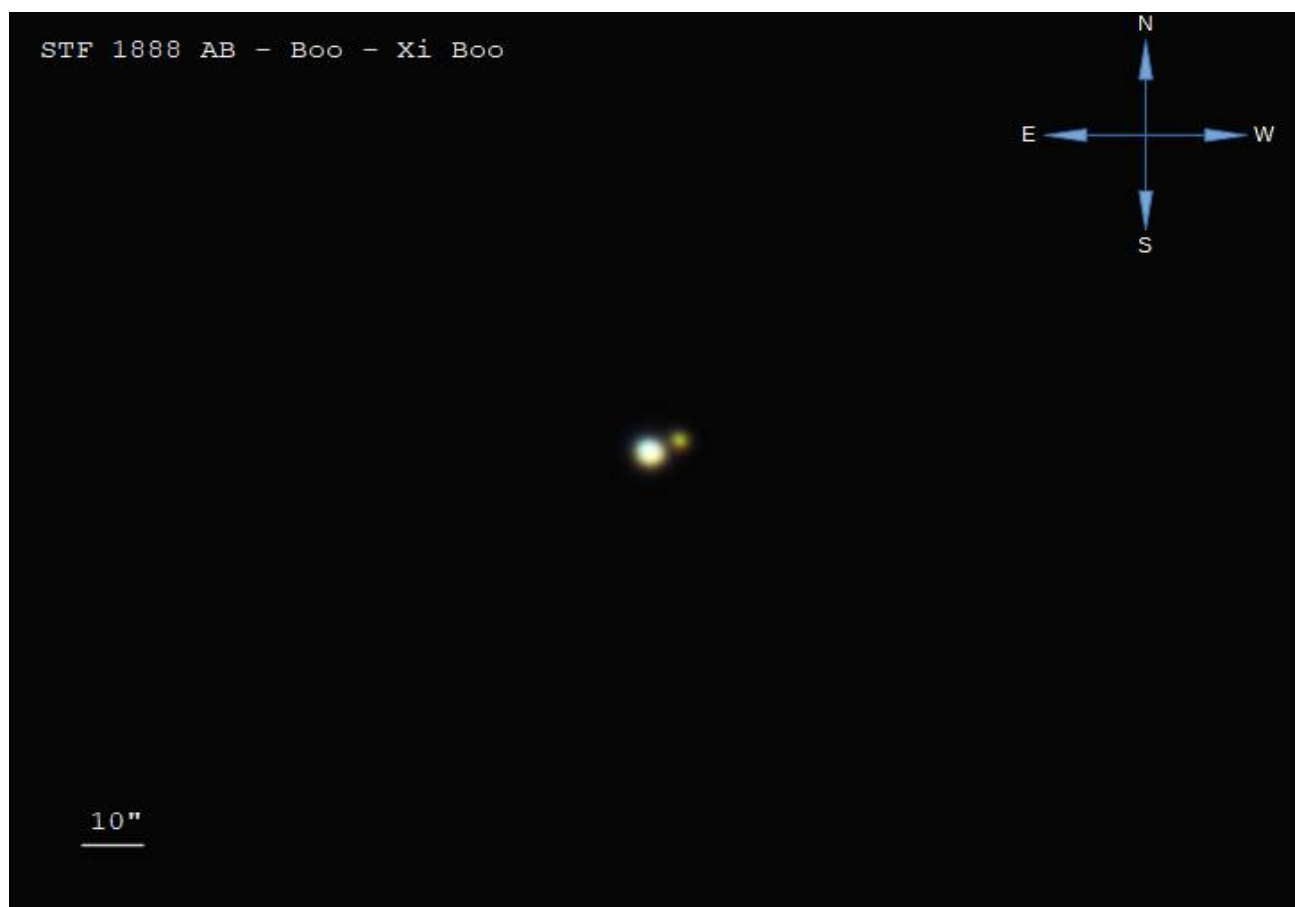
Telescope	Barlow	Filter	Mount	Camera	Camera Configuration
Equinox 120/900	-	-	GPD2	ZWO ASI120MC	- Capture Area=800x600 - Gain=20 - Exposure=400 ms - FrameCount=120

9.1.3 Image processing information

Image capturing	Image Processing	Post-Processing	Comment
SharpCap	AutoStakkert!, AIP4Win	Paintshop Pro, XnView	

9.1.4 Measurement Results

	SEP	PA
Measured :	5,1"	293,8°
Deviation :	-0,1"	-0,5°



10 Aladin Sky Atlas

Der Aladin Sky Atlas erlaubt Zugriff auf diverse Datenbanken und Kataloge und ist auch für Amateurastronomen frei verfügbar unter [14]. Besonders interessant ist für Doppelsternmessungen der Gaia EDR3 Katalog, aus dem für viele Doppelsterne der Abstand und Positionswinkel sehr präzise ermittelt werden können. Bevor dies möglich ist, muss Aladin aber korrekt konfiguriert werden, siehe nächstes Kapitel.

10.1 Aladin Konfiguration auf J2016 für Gaia DR3

- Laden des Gaia Kataloges
- Gaia EDR3 → Properties
 - **Epoch = J2016**

Achtung : Mit jedem Neustart wird die Epoche auf J2000 zurück gesetzt (!)

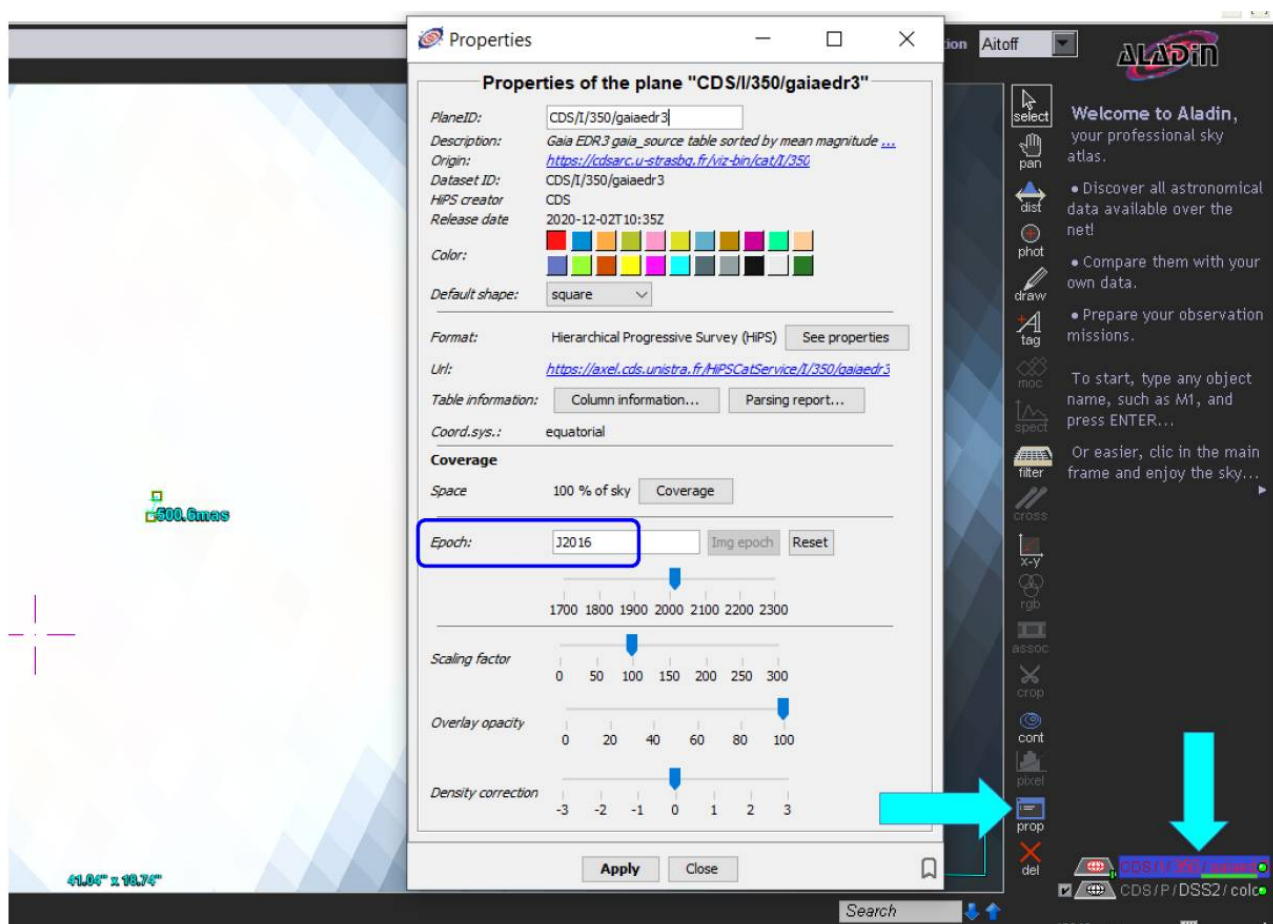


Abbildung 17: Aladin - Konfiguration auf J2016 (I)

Für noch genauere Messungen kann Aladin speziell konfiguriert werden. Leider war es mir bisher nicht möglich, der Anleitung von Pierre Fernique zu folgen, daher hier nur zur Information:

- Laden des Gaia Kataloges
- Gaia EDR3 → Properties
- Column information :
 - RA = RA_ICRS
 - DE = DE_ICRS
 - PMRA = pmra (1)
 - PMDE = pmde (1)
 -

(1) Die Referenzen zu Zeilen pmRA und pmDEC columns sollten für noch präzisere Messungen entfernt werden, was aber leider nicht möglich scheint (?)

The image shows the Aladin software interface. On the left, a table titled 'CDS/I/350/gaiaedr3' lists various astronomical columns. A dropdown menu is open for the 'Ref' column, showing options like 'RA', 'DE', 'PMRA', 'PMDE', 'GLON', and 'SGLON'. The 'PMRA' option is highlighted. On the right, the 'Properties' dialog for the plane 'CDS/I/350/gaiaedr3' is open. It contains various settings for the plane, including 'PlaneID', 'Description', 'Origin', 'Dataset ID', 'HIPS creator', 'Release date', 'Color', 'Default shape', 'Format', 'Url', 'Table information', 'Coord.sys.', 'Coverage', 'Space', 'Epoch', 'Scaling factor', 'Overlay opacity', and 'Density correction'. The 'Epoch' is set to J2016.

Abbildung 18: Aladin - Konfiguration auf J2016 (II)

10.2 Messung eines Doppelsterns in Aladin

Am Beispiel Mizar, STF1744AB. Leider kennt Aladin die üblichen Bezeichnungen (STF etc.) nicht. Bedauerlicherweise kann in Aladin auch nicht direkt die WDS Nummer verwendet werden da Aladin eine andere Syntax verwendet.

WDS : 13239+5456 (<https://www.stelledoppie.it/index2.php?iddoppia=56796>)

Aladin : 13:23.9+54:56

Alternativ kann man in Aladin auch folgende Bezeichner verwenden :

- Name des Sterns so vorhanden → Mizar
- Bayer Name → Zeta Ursae Majoris / Zet UMa
- BD Nummer → BD+55 1598
- Flamsteed Nummer → 79 UMa

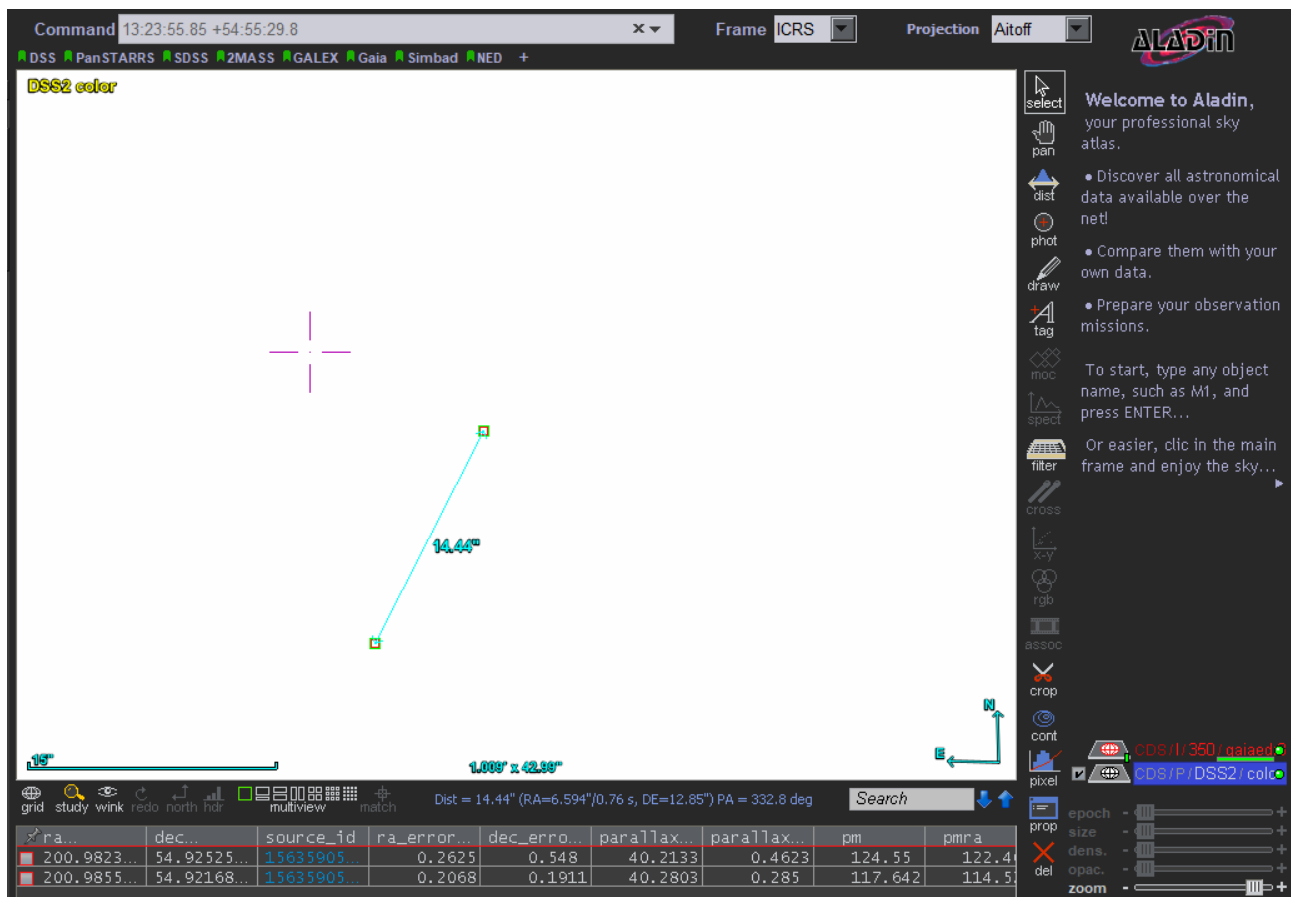


Abbildung 19: Aladin - Vermessung von Mizar (STF1744AB)

Leider berechnet Aladin den Positionswinkel basierend auf der südlicheren Komponente, in diesem Fall die schwächere. In diesen Fällen ist von dem in Aladin berechneten Wert 180° abzuziehen.

Mizar Distanz = 14,44''

Positionswinkel : 332,8° - 180° = 152,8°

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Doppelstern, Ansicht im astronomischen Fernrohr (umgekehrt und seitenverkehrt).....	3
Abbildung 2: Rayleigh Kriterium – Quelle der Grafik: [13].....	6
Abbildung 3: Quelle der Grafik: [13].....	7
Abbildung 4: Bessel Methode zur Messung der Brennweite eines Objektives.....	11
Abbildung 5: Verteilung von Messwerten - Quelle : [6].....	15
Abbildung 6: Baader Micro-Guide Messokular - Abbildung mit freundlicher Genehmigung © Baader Planetarium GmbH.....	16
Abbildung 7: Baader Micro-Guide – Abbildungsmaßstab - Abbildung mit freundlicher Genehmigung © Baader Planetarium GmbH.....	17
Abbildung 8: Blick von oben auf die ZWO ASI.....	18
Abbildung 9: SharpCap Einstellung.....	18
Abbildung 10: Kalibrierte Separation, kalibrierter Positionswinkel.....	20
Abbildung 11: AutoStakkert! - Konfiguration (I).....	21
Abbildung 12: AutoStakkert! - Konfiguration (II).....	22
Abbildung 13: AutoStakkert! - Quality Graph.....	23
Abbildung 14: AutoStakkert! - Stack Options.....	23
Abbildung 15: AutoStakkert! - α Her, Rasalgethi.....	24
Abbildung 16: AIP4Win - Mizar - Kalibrierungsmessung.....	25
Abbildung 17: Aladin - Konfiguration auf J2016 (I).....	28
Abbildung 18: Aladin - Konfiguration auf J2016 (II).....	29
Abbildung 19: Aladin - Vermessung von Mizar (STF1744AB).....	30

12 Copyright und Lizenzen

Dieses Dokument wurde veröffentlicht basierend auf der Creative Commons Lizenz CC-BY-NC-SA.

Copyright (C) 2022, CC-BY-NC-SA 4.0

[CC BY-NC-SA 4.0 DEED](#) - [CC BY-NC-SA 4.0 LIZENZ](#)

Abweichend von der o.g. Lizenz unterliegen folgende Bilder anderen Lizenzen :

Bild	Lizenz
Abbildung 6	Urheberrechtlich geschützt, © Baader Planetarium GmbH. Keine Weiterverwendung über dieses Dokument hinaus erlaubt.
Abbildung 7	Urheberrechtlich geschützt, © Baader Planetarium GmbH. Keine Weiterverwendung über dieses Dokument hinaus erlaubt.
Kompass-Rose	Quelle Wikipedia : CC BY-SA 4.0

13 Referenzen

- [1] Observing and Measuring Visual Double Stars (Second Edition) - R.W. Argyle (Editor)
- [2] [Auflösungsvermögen von Objektiven – hwi68 \(home.blog\)](#)
- [4] [AutoStakkert! – AS! Stacking Software – Lucky Imaging with an Edge – Emil Kraaikamp – AS!2, AS!3](#)
- [5] https://epsilon-lyrae.de/Doppelsterne/Mikrometervergleich/Mikrometervergleich_Leitz_Baader.html
- [6] [File:Standard deviation diagram micro.svg - Wikimedia Commons](#)
- [7] [Measuring The Focal Length of a Converging Lens \(devinswork.com\)](#)
- [8] [Bessel-Verfahren – Wikipedia](#)
- [9] [Jenseits des Rayleigh-Kriteriums : das Auflösungsvermögen von Teleskopen](#)
von : Dragesco, Jean / Hägi, Markus
- [10] [Observation of Large-Delta-Magnitude Close Binaries with Shaped Aperture Masks](#)
[Microsoft Word - JDSO online 9-10.docx](#)
- [11] [Beugungsscheibchen – Wikipedia](#)
- [12] [REDUC HELP \(astrosurf.com\)](#)
- [13] [Bessel Function | Desmos](#)
- [14] [Aladin Sky Atlas](#)
- [15] [JDSO - Calibrating the Plate Scale of a 20 cm Telescope with a Multiple-Slit Diffraction Mask](#)
- [16] [Baader Micro-Guide Messokular - Bedienungsanleitung](#)

14 Annex A

14.1 Bildinformationen

Folgende Bildinformationen sollten jedem Bild hinzugefügt werden welches veröffentlicht wird :

Linke obere Ecke :

<Double-Star ID> - <Star ID> - <Star Name>
<mag 1> + <mag 2> - <SEP> / <PA>

Beispiel :

STF 1744 AB - Zeta UMa - Mizar
2,2m + 3,9m - 14,6" / 153,4°

Rechte untere Ecke :

<Fernrohr> - <Zusatzelemente>
<Kamera> - <Stacked/Einzelbild (Xx)>
<Copyright> - <Datum>

Beispiel :

120/900 Equinox - no Barlow
ZWO ASI 120MC-S – Stacked (3x)
(C) Heiko Wichmann - 23.06.2022



– Beispiel für Bildinformationen –

15 Annex B

15.1 Links

Doppelsterne

→ www.epsilon-lyrae.de

VdS Doppelsternbeobachtungen

→ [Fachgruppe Deep-Sky - Vereinigung der Sternfreunde e.V. \(vdsastro.de\)](http://Fachgruppe-Deep-Sky-Vereinigung-der-Sternfreunde-e.V.-vdsastro.de)

VdS Journal Nr. 77 – Schwerpunkt Doppelsterne

→ [VdS Journal – Doppelsterne](#)

Tutorial zur Software REDUC von Florent Losse

→ [REDUC HELP \(astrosurf.com\)](http://REDUC-HELP.astrosurf.com)

Home of AIP4Win

→ AIP4Win@groups.io | [Home](#)

Cloudy Nights Forum – Double Star Observing

→ [Double Star Observing - Cloudy Nights](#)

→ [Getting Started in Double Star Research - Double Star Observing - Cloudy Nights](#)

→ [The BEST Triple Stars - Ranked! - Double Star Observing - Cloudy Nights](#)

Journal of Double Star Observations

→ JDSO.org

The Spirit of 33 – An international Network of Double Star Observers

→ [33 Doubles Observing Projects \(carbonar.es\)](http://33DoublesObservingProjects.carbonar.es) (a bit outdated)

The Webb Deep-Sky Society – Double Stars

→ [Webb Deep-Sky Society: Double Star Section \(webbdeepsky.com\)](http://Webb-Deep-Sky-Society-Double-Star-Section.webbdeepsky.com)

FAR STAR – Double and Multiple Stars

→ [Double and Multiple Stars \(far-star.de\)](http://Double-and-Multiple-Stars.far-star.de)

The Washington Double Star Catalog

→ [The Washington Double Star - Home | USNO \(navy.mil\)](http://The-Washington-Double-Star-Home-USNO.navy.mil)

→ <http://www.astro.gsu.edu/wds/> (outdated?)

Stelle Doppie (Front-end to multiple double star and other databases)

→ [Stelle Doppie - Double Star Database](http://Stelle-Doppie-Double-Star-Database)

VizieR database

→ [VizieR \(unistra.fr\)](http://VizieR.unistra.fr)

Aladin Sky-Atlas

→ <https://aladin.cds.unistra.fr/>

– end of document –