

Beispiel 4)

Messier 8 (Lagunennebel) mit einem Refraktor und einer Farbkamera (OSC) mit Duo Narrowband-Filter für OIII und H α (2x7 nm) und erhöhter Verstärkung

Multi Narrowband-Filter (oft Duo Narrowband) wurden für Farbkameras entwickelt, und es werden bei schmalbandigen Objekten gleichzeitig alle Pixel belichtet. Durch die blauen und grünen Filter der Bayermatrix gelangen so die Wellenlängen von z.B. OIII und H β auf das jeweilige Pixel. Auf das benachbarte Pixel mit dem darüberliegenden roten Filter gelangen dann H α und/oder NII bzw. je nach Filterbreite auch SII-Photonen. Vier benachbarte Pixel werden dann zu einem farbigen Bildpunkt zusammengerechnet.

Wie in Beispiel 2) wird angenommen, dass die Quanteneffizienz um ca. 10% unterhalb der Monovariante liegt, da das Licht die Bayermatrix und dabei zwei Grenzflächen durchquert. (Die Quanteneffizienz des Chips verändert sich durch die Bayermatrix aber nicht.) Da die benachbarten Farbpixel (RGGB) intern zu einem Pixel zusammengefasst werden, wird für die Berechnung der durch das Himmelsleuchten erzeugten Elektronen näherungsweise das V-Band verwendet.

Vorgehensweise: (ausführliche Informationen zu den Formeln sind dem Hauptdokument zu entnehmen)

- 1) Berechnung der Elektronen des Himmelhintergrunds mit folgender Formel:

$$S_H = N_0 * T * QE * \frac{1}{g} * \frac{\pi}{4} * D^2 * (1 - \varepsilon^2) * \left(206,2648 * \frac{P}{f}\right)^2 * \Delta\lambda * 10^{-0,4 * m_H}$$

wobei für m_H der Wert der Flächenhelligkeit der Lichtverschmutzung eingesetzt wird.

Bei den Werten für das Himmelsleuchten von <https://www.lightpollutionmap.info>, durchquert das Licht nicht mehr die Atmosphäre (<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0108052>). Daher spielt in der Formel für T nur noch die Transmission der Optik eine Rolle.

Es werden hierbei für N_0 die Werte des Frequenzbandes eingesetzt, bei denen der Filter besonders „effektiv“ ist.

Hell-Filter $\rightarrow N_0$ aus **B-Band** (dieses Mal nicht multipliziert mit 1,2, weil nur eine sehr schmale Bandbreite betrachtet wird)

H β -Filter $\rightarrow N_0$ aus **B-Band** (dieses Mal nicht multipliziert mit 1,2, weil nur eine sehr schmale Bandbreite betrachtet wird)

OIII-Filter $\rightarrow N_0$ aus **V-Band**

HeI-Filter $\rightarrow N_0$ aus **R-Band**

H α -Filter $\rightarrow N_0$ aus **R-Band**

NII-Filter $\rightarrow N_0$ aus **R-Band**

SII-Filter $\rightarrow N_0$ aus **R-Band**

2) Berechnung der Objektelektronen mit folgender Formel:

$$S_P = \frac{F_\lambda}{A_{obj}} * T * QE * \frac{1}{g} * \frac{\pi}{4} * D^2 * (1 - \varepsilon^2) * \left(206,2648 * \frac{P}{f}\right)^2$$

wobei F_λ für einen Emissionsnebel über die folgenden Formeln abgeschätzt wird:

$$F_\lambda = \frac{N_0 \left[\frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}\right] * 10^{-0,4*m}}{\sum T_{\lambda B} * r_{\lambda B}} * r_\lambda$$

3) Einsetzen der Elektronenzahl des Himmelhintergrunds von 1) in folgende Formel, um die Belichtungszeit für hintergrundlimitierte Aufnahmen zu ermitteln:

$$t_H = \frac{1}{\left(\frac{100 + E}{100}\right)^2 - 1} * \frac{R_A^2}{S_H}$$

4) Berechnung der benötigten Bilderanzahl für hintergrundlimitierte Aufnahmen und vorgegebenen SNR, wenn S_H , S_P und t_h in folgende Formel eingesetzt werden:

$$N_P = SNR^2 * \frac{(S_P * t_H) + (S_H * t_H) + (S_D * t_H) + R_A^2}{S_P^2 * t_H^2}$$

5) Überprüfung, ob bei der verwendeten Verstärkung und hintergrundlimitierter Belichtungszeit die Full Well Capacity überschritten wurde:

$$S_{FWC} = (S_P + S_H + S_D) * t < FWC$$

Gegeben:

Allgemeine Bedingungen:

$$N_V = 10.052 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s nm}} \text{ (Beleuchtungsstärke von Vega im V-Band bei 545 nm)}$$

$$N_R = 7.187 \frac{\text{Photone}}{\text{cm}^2 \text{ s nm}} \text{ (Beleuchtungsstärke von Vega im R-Band bei 641 nm)}$$

$$T_{\text{Atm_OIII}} = 0,730 \text{ (0,341 mag bei 500,7 nm bei einer Objekthöhe von } 60^\circ \text{ über dem Horizont)}$$

$$T_{\text{Atm_H}\alpha} = 0,849 \text{ (0,178 mag bei 656,3 nm bei einer Objekthöhe von } 60^\circ \text{ über dem Horizont)}$$

$$m_H = 20,5 \frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2} \text{ (Annahme: konstant über den gesamten Frequenzbereich)}$$

Teleskop: 80/480 Apochromatischer Refraktor

$T = 0,645$ (t_{Linse}^n – Refraktor mit sechs Glasflächen (drei Linsen mit einer Transmission $t=0,96$, ein Flattener, ein Schutzglas vor dem Chip) und ein H α -, OIII- oder SII-Filter mit einer Gesamttransmission von 97%); (die Bayermatrix ist schon über die Quanteneffizienz verrechnet))

$\varepsilon = 0$ (0% Obstruktion)

$D = 8$ cm (80 mm Teleskopöffnung)

$f = 480$ mm

Kamera und Filter: ZWO ASI294MC Pro (<https://www.zwoastro.com/product/asi294/>)

$QE_{\text{OIII}} \approx 0,74$ (84% Quanteneffizienz im OIII-Bereich minus 10% wegen Bayermatrix)
(<http://www.astrosurf.com/buil/asi294mm.html>)

$QE_{\text{H}\alpha} \approx 0,44$ (54% Quanteneffizienz im H α -Bereich minus 10% wegen Bayermatrix)
(<http://www.astrosurf.com/buil/asi294mm.html>)

$g = 0,7 \frac{e^-}{\text{ADU}}$ (mit gain bei 150)

$R_A = 1,7 e^-$ (RMS) (bei gain = 150)

$P = 4,63 \mu\text{m}$

$S_D = 0,019 \frac{e^-}{\text{Pixel s}}$ (bei 0°C)

$\text{FWC} = 10.000 e^-$ (bei gain = 150)

Annahme für Bayermatrix: die Transmissionskurven des blauen und grünen Filters der Bayermatrix haben im Bereich der Wellenlänge für OIII eine ähnliche Transmission.

$\Delta\lambda = 2*7$ nm (für Himmel; wegen der Filterbandbreite des Schmalbandfilters)

Objektdaten: Messier 8

Scheinbare Größe: 90' x 35' (5.400" x 2.100") \rightarrow Fläche A_{obj} : 11.340.000 arcsec²
(<https://de.wikipedia.org/wiki/Lagunennebel>)

$m_{\text{PV}} = 6$ mag (V-Band) (<https://de.wikipedia.org/wiki/Lagunennebel>)

Verhältnis OIII : Ha : SII = 0,3 : 0,5 : 0,2 (abgeschätzt durch Emissionslinienbilder von dieser Seite
<https://cosgrovescosmos.com/projects/messier-8-lagoon-nebula-hubble-sho>)

Aber: SII wird vom Duo Narrowband-Filter blockiert, muss jedoch für die Betrachtung mit einbezogen werden. Hierbei gelangt eine gewisse Ungenauigkeit in die Rechnung, da a) die Verhältnisschätzung nicht sehr genau ist, und b) nicht garantiert ist, dass nur diese Emissionslinien die Magnitudenhelligkeit verursachen.

Schritt 1) Berechnung der Elektronen des Himmelhintergrunds: → T_{Atm} entfällt

V-Band: ($\Delta\lambda = 7 \text{ nm}$) (für Pixel mit grünem und blauem Filter)

$$S_{H_b/g} = 10.052 * 0,645 * 0,74 * \frac{1}{0,7} * \frac{\pi}{4} * 8^2 * (1 - 0^2) * \left(206,2648 * \frac{4,63}{480}\right)^2 * 7 * 10^{-0,4*20,5}$$
$$S_{H_b/g} = 0,0602227 \frac{e}{\text{Pixel s}}$$

Durch die Annahme, dass die Transmissionskurven des blauen und grünen Filters der Bayermatrix im Bereich der Wellenlänge für OIII eine ähnliche Transmission haben, gilt dieser Wert sowohl für Pixel mit blauem als auch mit grünem Filter.

R-Band: ($\Delta\lambda = 7 \text{ nm}$) (für Pixel mit rotem Filter)

$$S_{H_r} = 7.187 * 0,645 * 0,44 * \frac{1}{0,7} * \frac{\pi}{4} * 8^2 * (1 - 0^2) * \left(206,2648 * \frac{4,63}{480}\right)^2 * 7 * 10^{-0,4*20,5}$$
$$S_{H_r} = 0,0256009 \frac{e^-}{\text{Pixel s}}$$

Schritt 2) Berechnung der Objektelektronen:

$$F_{OIII} = \frac{844.353,2998 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}} * 10^{-0,4*6}}{0,08 * 0 + 0,76 * 0,3 + 0,60 * 0 + 0,05 * 0,5 + 0,04 * 0 + 0,02 * 0,2} * 0,3 = 3.923,8494529 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

$$F_{H\alpha} = \frac{844.353,2998 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}} * 10^{-0,4*6}}{0,08 * 0 + 0,76 * 0,3 + 0,60 * 0 + 0,05 * 0,5 + 0,04 * 0 + 0,02 * 0,2} * 0,5 = 6.539,7490882 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

$$F_{SII} = \frac{844.353,2998 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}} * 10^{-0,4*6}}{0,08 * 0 + 0,76 * 0,3 + 0,60 * 0 + 0,05 * 0,5 + 0,04 * 0 + 0,02 * 0,2} * 0,2 = 2.615,8996353 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

Die Photonen von SII werden nicht weiter in die Berechnung eingehen, da sie vom Duo Narrowband-Filter blockiert werden.

OIII-Filter: ($F_{OIII} = 3.923,8494529 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$)

$$S_{P_b/g} = \frac{3.923,8494529}{11.340.000} * (0,730 * 0,645) * 0,74 * \frac{1}{0,7} * \frac{\pi}{4} * 8^2 * (1 - 0^2) * \left(206,2648 * \frac{4,63}{480}\right)^2$$
$$S_{P_b/g} = 0,0342873 \frac{e}{\text{Pixel s}}$$

Durch die Annahme, dass die Transmissionskurven des blauen und grünen Filters der Bayermatrix im Bereich der Wellenlänge für OIII eine ähnliche Transmission haben, gilt dieser Wert sowohl für Pixel mit blauem als auch mit grünem Filter.

H α -Filter: ($F_{H\alpha} = 6.539,7490882 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$)

$$S_{P_r} = \frac{6.539,7490882}{11.340.000} * (0,849 * 0,645) * 0,44 * \frac{1}{0,7} * \frac{\pi}{4} * 8^2 * (1 - 0^2) * \left(206,2648 * \frac{4,63}{480}\right)^2$$

$$S_{P_r} = 0,0394710 \frac{e^-}{\text{Pixel s}}$$

Schritt 3) Berechnung der Belichtungszeit für hintergrundlimitierte Aufnahmen:

E = 5%

$$t_{H_{b/g}} = \frac{1}{\left(\frac{100+5}{100}\right)^2 - 1} * \frac{1,7^2}{0,0602227} = 468,18 \text{ s}$$

$$t_{H_r} = \frac{1}{\left(\frac{100+5}{100}\right)^2 - 1} * \frac{1,7^2}{0,0256009} = 1.101,33 \text{ s}$$

Da die Pixel durch den Duo Narrowband-Filter gleichzeitig belichtet werden, sollte dies nur so lange geschehen, wie es die kleinste hintergrundlimitierte Aufnahmezeit zulässt. Es wird hier also mit der Belichtungszeit für die Pixel mit blauem und grünem Filter weitergerechnet.

Die Belichtungszeit bei hintergrundlimitierten Aufnahmen gibt an, ab wann das Himmelsleuchten dominiert. Zu lange Belichtungszeiten führen beim Guiding ab und an zu Schwierigkeiten, oder es kommt bei sehr hellen Planetarischen Nebeln zur Sättigung der Pixel. Daher wird hier ein Faktor eingeführt, der bei Bedarf die Belichtungszeiten etwas reduziert:

$$t_{H_{b/g}} = \frac{468,18 \text{ s}}{2} = 234,09 \text{ s}$$

Schritt 4) Berechnung der benötigten Bilderanzahl für hintergrundlimitierte Aufnahmen:

SNR = 5

$$N_{P_{b/g}} = 5^2 * \frac{(0,0342873 * 234,09) + (0,0602227 * 234,09) + (0,019 * 234,09) + 1,7^2}{0,0342873^2 * 234,09^2}$$

$N_{P_{b/g}} = 11$ Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 234,09 s \rightarrow 44,6 min oder 0,7 h

$$N_{P_r} = 5^2 * \frac{(0,0394710 * 234,09) + (0,0256009 * 234,09) + (0,019 * 234,09) + 1,7^2}{0,0394710^2 * 234,09^2}$$

$N_{P_r} = 7$ Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 234,09 s \rightarrow 25,8 min oder 0,4 h

Die Pixel mit den roten Filtern erreichen schneller ein SNR von 5, als die Pixel unter den blauen und grünen Filtern der Bayermatrix. Es empfiehlt sich aber die Belichtungszeit und Anzahl Bilder der Pixel mit blauem und grünem Filter zu wählen, um das Rauschen im Bild weiter zu minimieren.

Schritt 5) Überprüfung der Full Well Capacity:

$$S_{FWC_{b/g}} = (0,0342873 + 0,0602227 + 0,019) * 234,09 = 26,6 < FWC$$

$$S_{FWC_r} = (0,0394710 + 0,0256009 + 0,019) * 234,09 = 19,7 < FWC$$