



Schmalbandfilter an astronomischen Teleskopen

Baader-Planetarium GmbH

25. April 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Optische Interferenzfilter	2
2	Interferenzfilter am Teleskop (im Strahlenbündel)	2
2.1	Winkelabhängigkeit	2
2.2	Strahlenbündel und Abschattung	2
2.3	Große Öffnungsverhältnisse ($> f/4$)	4
2.4	Kleine Öffnungsverhältnisse ($< f/4$)	5
3	Pre-shifted Filter zur Kompensation der Blauverschiebung	7
3.1	H-Alpha 6.5nm Narrowband	8
3.2	SII 6.5nm Narrowband	9
3.3	OIII 6.5nm Narrowband	10
3.4	H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband	11
3.5	SII 4nm Ultra-Narrowband	12
3.6	OIII 4nm Ultra-Narrowband	13
4	Narrowband oder Ultra-Narrowband?	14
5	Filterauswahl nach Öffnungsverhältnis und zentraler Abschattung	16
5.1	H-Alpha 6.5nm Narrowband Filter Auswahl	17
5.2	SII 6.5nm Narrowband Filter Auswahl	18
5.3	OIII 6.5nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl	19
5.4	H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl	20
5.5	SII 4nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl	21
5.6	OIII 4nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl	22
A	SNR Vergleich von Schmalbandfiltern	23

Dieses Dokument erklärt den physikalischen Hintergrund der Verwendung von schmalbandigen Interferenzfiltern an astronomischen Teleskopen. Es soll den Anwender in die Lage versetzen, den optimalen Filter für seine Teleskope zu wählen.

1 Optische Interferenzfilter

Optische Interferenzfilter bestehen aus optischem Glas, auf welches dünne, transparente Schichten von Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex aufgebracht werden. Die Teilreflexionen an den Schichtgrenzen führen zu Interferenz des reflektierten und einfallenden Lichtes. Der dielektrische Schichtaufbau wird so entworfen, dass der Filter das gewünschte Transmissions bzw. Reflexionsverhalten erhält.

2 Interferenzfilter am Teleskop (im Strahlenbündel)

2.1 Winkelabhängigkeit

Die Interferenzwirkung ist abhängig vom Einfallswinkel des Lichtstrahls. Wird der Filter im parallelen Strahlengang gekippt, bzw. trifft das Licht unter einem anderen Einfallswinkels als 0° (senkrecht) auf, kommt es zu einer Änderung der Filtercharakteristik. Der Filterbandpass erfährt eine Blauverschiebung, wird also zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben. Dies kann durch folgende Formel angenähert werden:

λ_θ	Wellenlänge unter Einfallswinkel ϕ
λ_0	Wellenlänge bei Einfallswinkel 0°
θ	Einfallswinkel
n_0	Brechungsindex des Einfallsmediums (Luft)
n_{eff}	Effektiver Brechungsindex des Filters

$$\lambda_\phi = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \sin\theta}{n_{eff}} \right)^2} \quad (1)$$

Die Blauverschiebung ist direkt proportional zur Wellenlänge sowie zum Einfallswinkel, fällt also bei größeren Wellenlängen und größeren Einfallswinkeln stärker aus.

2.2 Strahlenbündel und Abschattung

An einem astronomischen Teleskop passiert das einfallende Licht den Interferenzfilter unter einer Vielzahl von Winkeln. Je kleiner das Öffnungsverhältnis (Brennweite geteilt durch Öffnung), desto größer sind die Unterschiede der Einfallswinkel von Rand- bzw. Zentralstrahlen des Lichtbündels.

$$f/\# = \frac{f}{D} \quad (2)$$

Abbildung 1 auf der nächsten Seite zeigt die unterschiedlichen Einfallswinkel von Zentral- und Randstrahl.

- θ_{min} : Einfallswinkel der Zentralstrahlen (kleinster Einfallswinkel am Filter)
- θ_{max} : Einfallswinkel der Randstrahlen (größter Einfallswinkel am Filter)

Der effektive Bandpass $T(\lambda)$ eines Interferenzfilters am realen Teleskop entsteht also durch Überlagerung der winkelabhängigen Einzelbandpässe $T(\lambda, \theta)$ von allen unterschiedlichen Einfallswinkeln. Mathematisch wird über die winkelabhängige Transmissionsfunktion, gewichtet mit dem Kreisumfang $U(\theta)$, vom Einfallswinkel des Zentralstrahls θ_{min} bis zum Einfallswinkel des Randstrahls θ_{max} integriert.

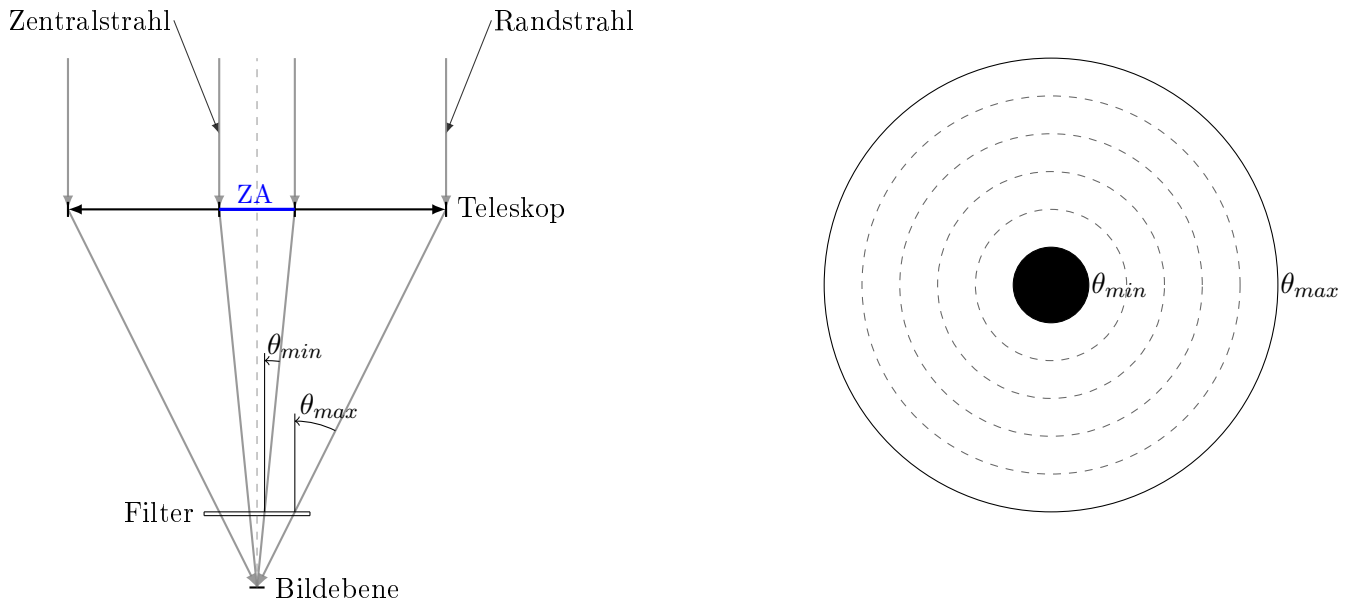


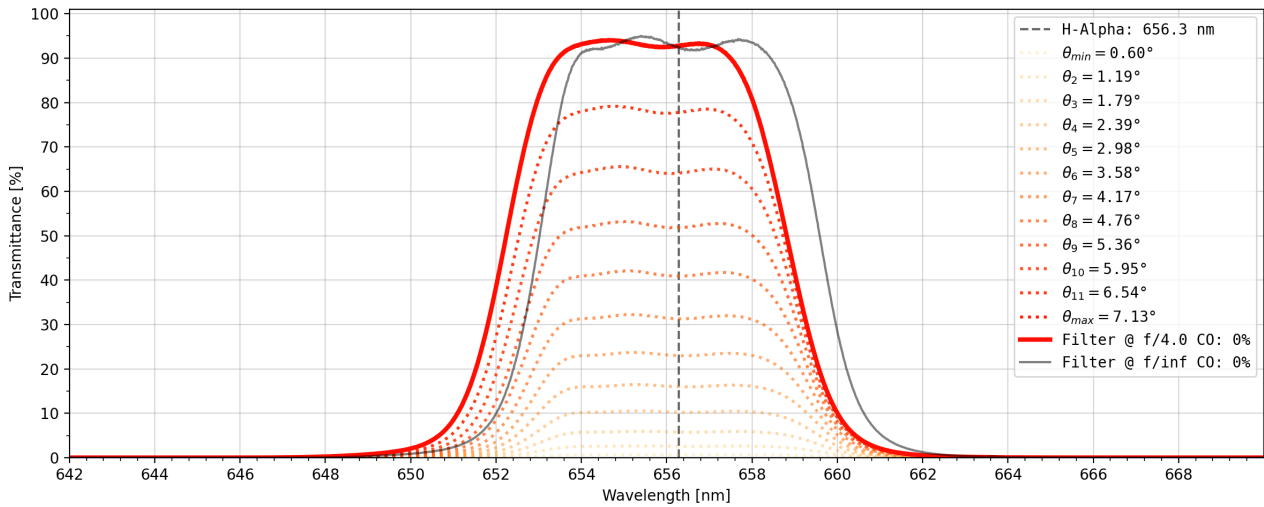
Abbildung 1: links: Teleskop Lichtbündel mit zentraler Abschattung (ZA). rechts: Draufsicht auf Teleskopöffnung mit Teilringen (θ_{min} bis θ_{max}).

$$T_{eff}(\lambda) = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} T(\lambda, \theta) U(\theta) d\theta \quad (3)$$

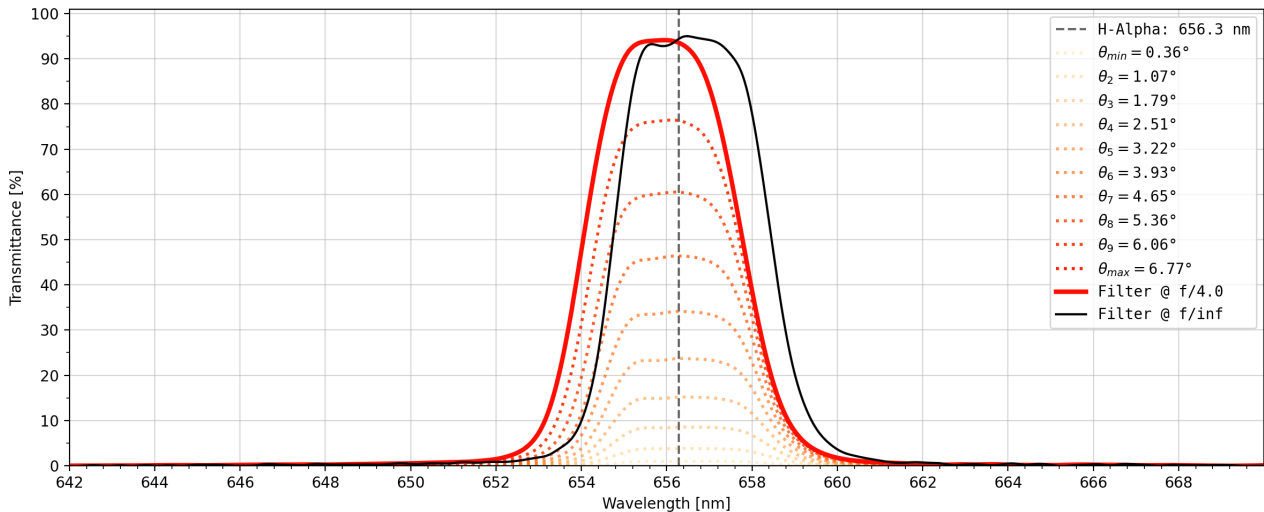
Abbildung 2 auf der nächsten Seite zeigt zwei H-Alpha Filter mit unterschiedlicher Bandpassbreite bei einem Öffnungsverhältnis von $f/4$. Die Teleskopöffnung wird in zwölf Teilringe gleicher Breite unterteilt und der jeweilige Einzelbandpass $T(\theta)$ des Teilringes anhand des mittleren Einfallswinkels berechnet. Der effektive Bandpass T_{eff} des gesamten Strahlenbündels entsteht durch Addition der Einzelbandpässe. Die Abbildung zeigt in gepunkteten Linien die Beiträge der Einzelbandpässe (Innen nach Außen) zum effektiven Bandpass. Da die Fläche der Teilringe mit zunehmendem Radius quadratisch steigt, werden die äußeren Teilringe ihrer größeren Fläche entsprechend stärker gewichtet, haben also einen größeren Einfluss auf den gesamten effektiven Bandpass als die inneren, kleineren Teilringe.

2.3 Große Öffnungsverhältnisse ($> f/4$)

Die Winkelabhängigkeit des Interferenzfilters hat für Teleskope mit großem Öffnungsverhältnis ($> f/4$) quasi keine Bedeutung, da die Winkeldifferenz und damit die Blauverschiebung verhältnismäßig klein sind. Abbildung 2a und 2b zeigt jeweils H-Alpha Filter mit einer Halbwertsbreite von 6.5 nm bzw. 3.5 nm bei $f/4$. Die Blauverschiebung ist so gering, dass der Filter immer noch annähernd maximale Transmission bei $H\alpha = 656.3\text{ nm}$ hat.



(a) Bandpass eines H-Alpha 6.5 nm Narrowband Filters im parallelen Strahlengang ($f/infinity$) sowie bei einem Öffnungsverhältnis von $f/4$. Die Blauverschiebung hat keinen Einfluss auf die maximale Transmission bei $H\alpha$.



(b) Bandpass eines H-Alpha 3.5 nm Ultra-Narrowband Filter im parallelen Strahlengang ($f/infinity$) sowie bei einem Öffnungsverhältnis von $f/4$. Die Blauverschiebung hat keinen Einfluss auf die maximale Transmission bei $H\alpha$.

Abbildung 2: H-Alpha 6.5 nm Narrowband und 3.5 nm Ultra-Narrowband (zentriert auf die $H\alpha$ Emissionslinie) Filter im $f/4$ Strahlengang. Die gepunkteten Graphen zeigen den kumulierten Beitrag der Einzelbandpässe von 12 Teilringen der Teleskopöffnung mit den jeweiligen mittleren Einfallswinkeln θ des Teilrings. Mit steigendem Winkel θ nimmt sowohl die absolute Blauverschiebung, als auch die Fläche des Teilrings zu und damit dessen Beitrag zum effektiven Gesamtbandpass.

2.4 Kleine Öffnungsverhältnisse ($< f/4$)

Für Teleskope mit kleinem Öffnungsverhältnis ist die Blauverschiebung jedoch sehr relevant, da hier die Winkeldifferenzen größer ausfallen. Das führt zu einer größeren Blauverschiebung ($\sim \theta_{max}$), als auch zu einer stärkeren Verbreiterung des Bandpasses ($\sim \Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$). Abbildungen 3 bis 4b auf der nächsten Seite, verdeutlichen, dass sich die maximale Transmission eines auf die Zielwellenlänge, zentrierten Schmalbandfilters durch die Blauverschiebung ohne eine geeignete Kompensation (siehe Abschnitt 3) deutlich verringern würde.

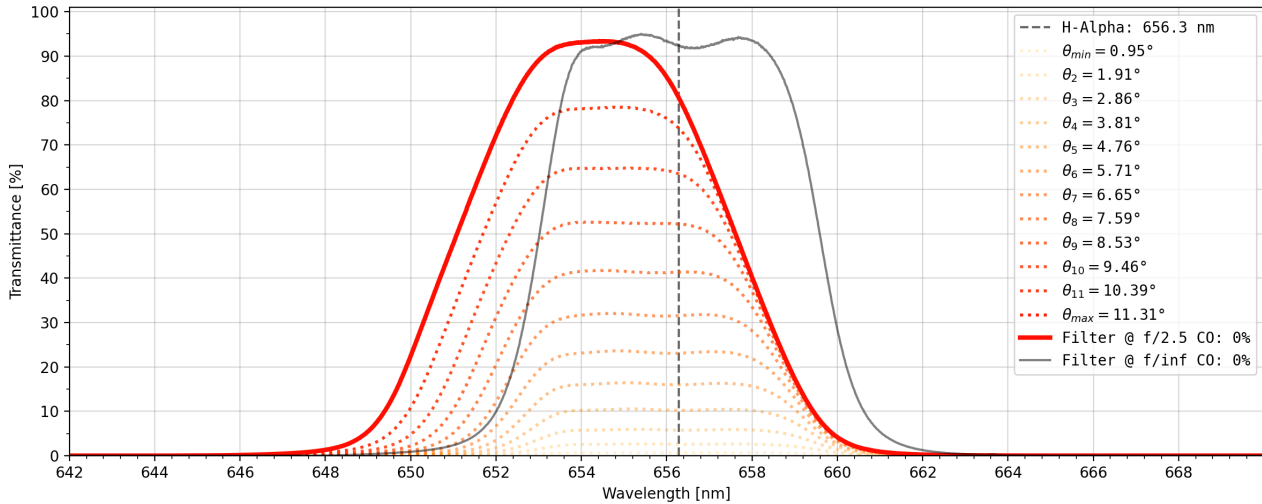
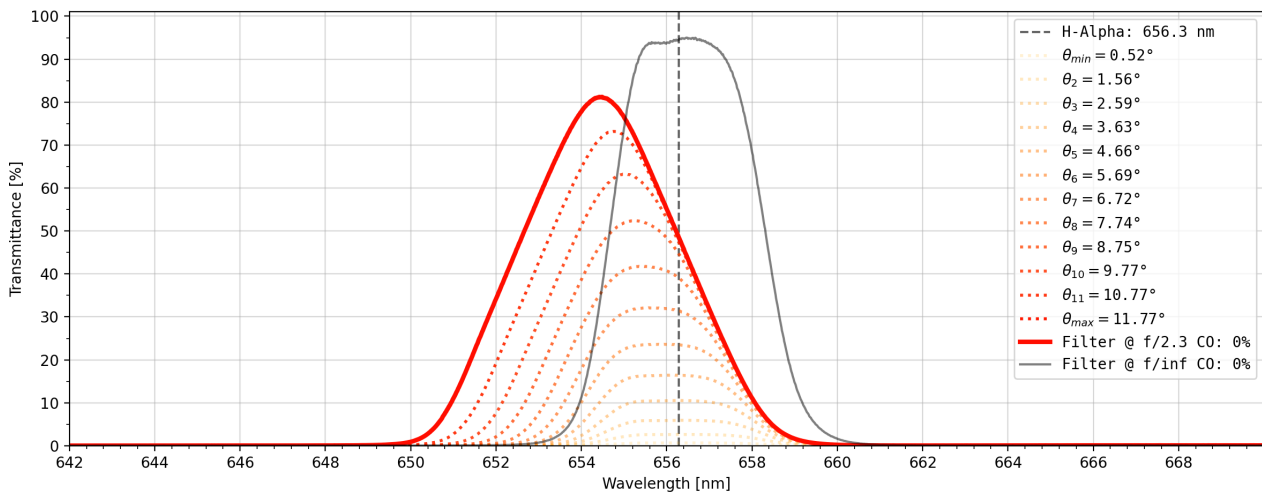
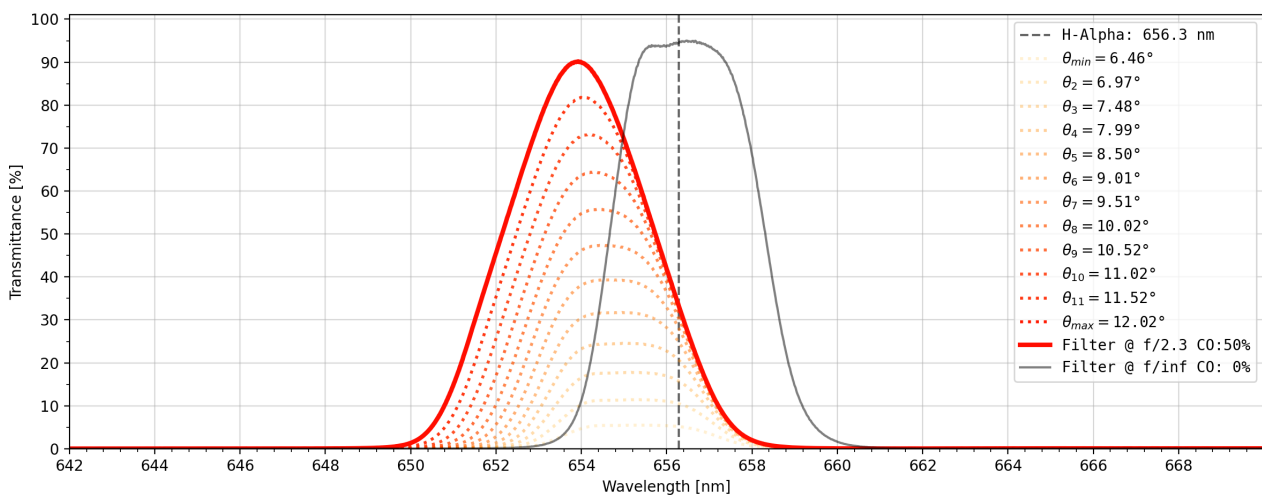


Abbildung 3: Effektiver Bandpass eines auf $H\alpha$ zentrierten 6.5nm Narrowband Filters im parallelen Strahlengang (f/inf) sowie bei einem Öffnungsverhältnis von $f/2.5$. Die gepunkteten Graphen zeigen den kumulierten Beitrag der Einzelbandpässe von 12 Teilringen der Teleskopöffnung mit den jeweiligen Einfallswinkeln θ . Je größer der Teilring, desto größer die Blauverschiebung und ihr Beitrag am effektischen Bandpass. Aufgrund der Blauverschiebung würde die maximale Transmission bei $H\alpha$ nur noch ca. 80% betragen!



(a) Effektiver Bandpass eines auf $H\alpha$ zentrierten H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter im parallelen Strahlengang ($f/infinity$) sowie bei einem Öffnungsverhältnis von $f/2.3$. Aufgrund der Blauverschiebung würde die maximale Transmission bei $H\alpha$ nur noch ca. 50% betragen.



(b) Effektiver Bandpass eines auf $H\alpha$ zentrierten H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter im parallelen Strahlengang ($f/infinity$) sowie bei einem Öffnungsverhältnis von $f/2.3$ mit einer zentralen Abschattung von 50% (des Durchmessers). Die zentrale Abschattung führt zu einer stärkeren Blauverschiebung bei schmalerer Halbwertsbreite. Aufgrund der Blauverschiebung würde die maximale Transmission bei $H\alpha$ nur noch ca. 30% betragen!

Abbildung 4: H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter (zentriert auf die $H\alpha$ Emissionslinie) im $f/2.3$ Strahlengang. Die gepunkteten Graphen zeigen den kumulierten Beitrag der Einzelbandpässe von 12 Teilringen der Teleskopöffnung mit den jeweiligen Einfallswinkeln θ . Je größer der Teilring, desto größer die Blauverschiebung und ihr Beitrag am effektiven Bandpass. Ein auf die $H\alpha$ zentrierter Schmalbandfilter hätte bei kleinem Öffnungsverhältnis und gegebenenfalls zusätzlicher zentraler Abschattung aufgrund der Blauverschiebung eine niedrigere Transmission.

3 Pre-shifted Filter zur Kompensation der Blauverschiebung

Teleskope mit kleinem Öffnungsverhältnis benötigen Filter, welche von Werk aus eine Rotverschiebung (sog. *pre-shift*) erhalten, die die Blauverschiebung kompensiert. Baader-Planetarium GmbH bietet bei Schmalbandfiltern neben normalen *Narrowband* Filtern (ohne *pre-shift*), noch zwei weitere Kategorien von sog. *Highspeed* Filtern mit *pre-shift* für unterschiedliche Öffnungsverhältnisse an:

6.5nm Narrowband Filter werden in zwei Kategorien angeboten:

Filterbezeichnung	optimales Öffnungsverhältnis
Narrowband	$> f/3.4$
Highspeed f/2	$\leq f/3.4$

Tabelle 1: 6.5nm **Narrowband** Kategorien nach Öffnungsverhältnis

3.5nm/4nm Ultra-Narrowband Filter werden in drei Kategorien angeboten:

Filterbezeichnung	optimales Öffnungsverhältnis
Ultra-Narrowband	$> f/3.4$
Ultra-Highspeed f/3	$f/2.3 - f/3.4$
Ultra-Highspeed f/2	$< f/2.3$

Tabelle 2: 3.5nm bzw. 4nm **Ultra-Narrowband** Kategorien nach Öffnungsverhältnis

Abbildungen 5 bis 10 zeigen den effektiven Bandpass von H-Alpha, SII und OIII *Narrowband* Filter (Abb. 5 bis 7) mit 6.5 nm Halbwertsbreite sowie *Ultra-Narrowband* (Abb. 8 bis 10) Filter mit 3.5 nm bzw. 4 nm Halbwertsbreite bei den geeigneten Öffnungsverhältnissen.

3.1 H-Alpha 6.5nm Narrowband

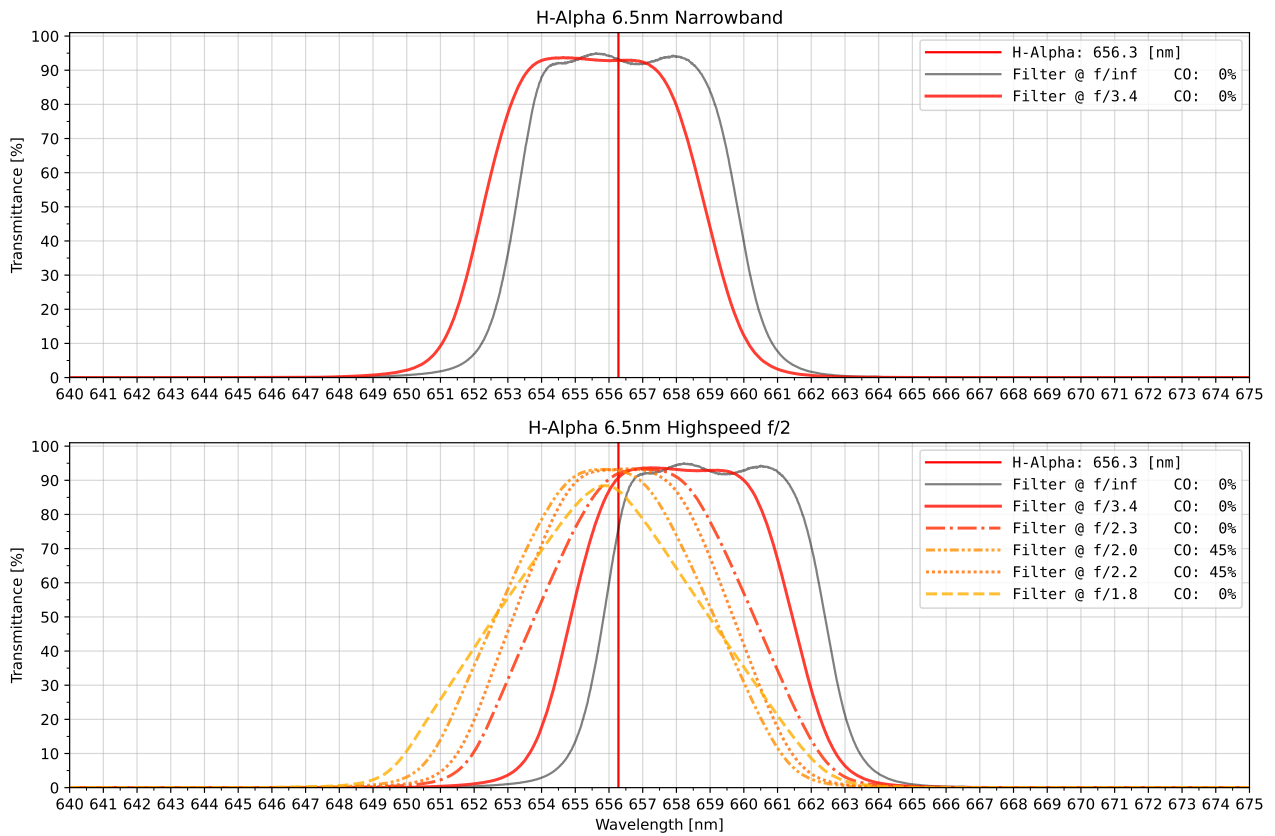


Abbildung 5: Effektiver Bandpass des **H-Alpha 6.5nm Narrowband** (oben) und **H-Alpha 6.5nm Highspeed f/2** (unten) Filter bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung **CO** (Central **O**bstruction) in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche!). (f/∞ = paralleler Strahlengang)

3.2 SII 6.5nm Narrowband

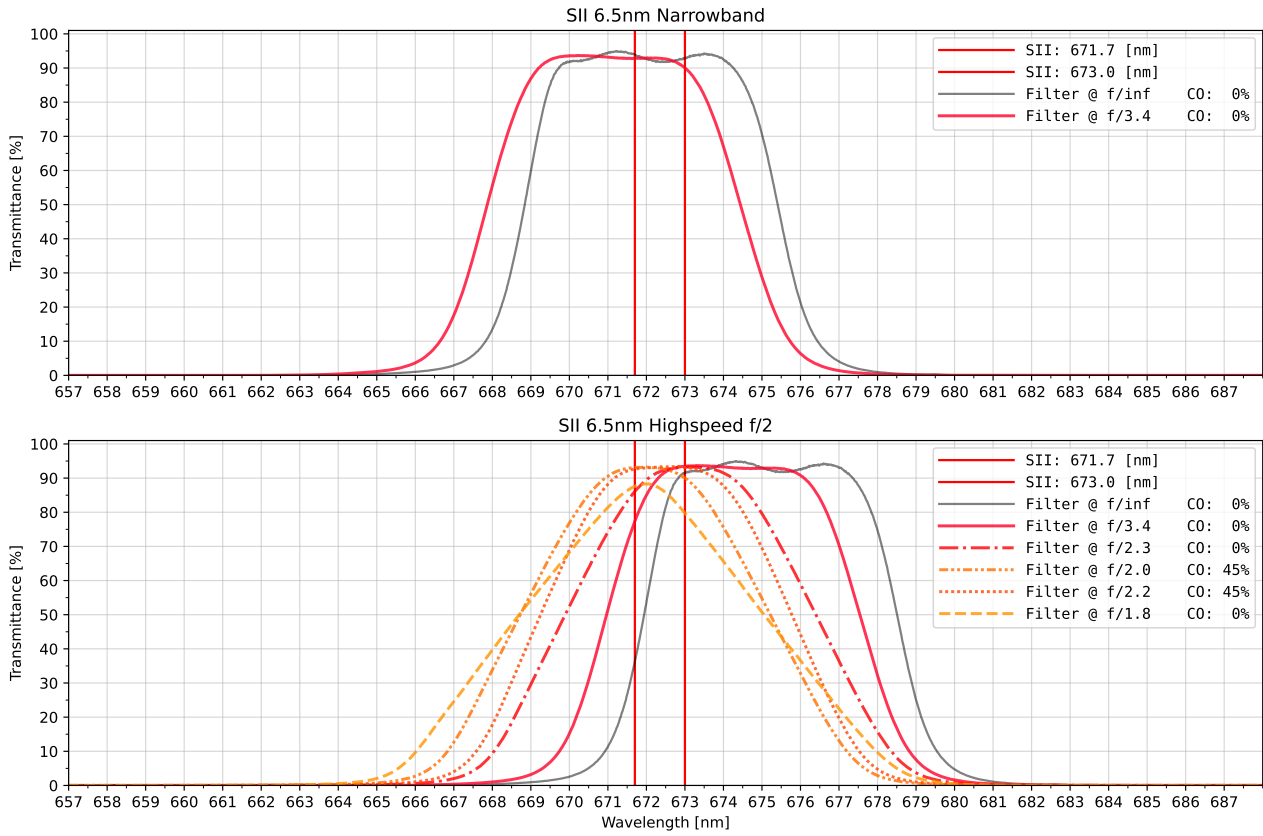


Abbildung 6: Effektiver Bandpass des **SII 6.5nm Narrowband** (oben) und **SII 6.5nm Highspeed f/2** (unten) Filter bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung **CO** = (Central Obstruction) in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche). (**f/inf** = paralleler Strahlengang)

3.3 OIII 6.5nm Narrowband

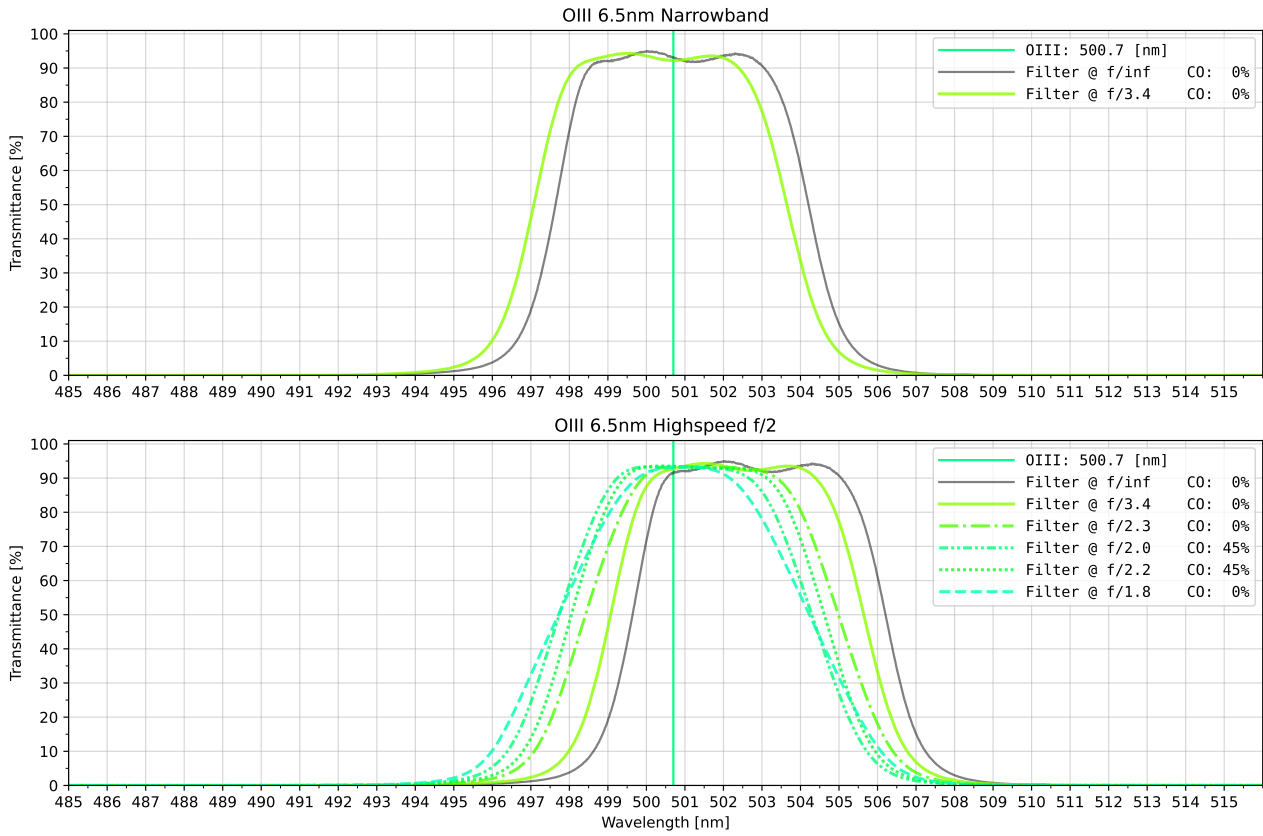


Abbildung 7: Effektiver Bandpass des **OIII 6.5nm Narrowband** (oben) und **OIII 6.5nm Highspeed f/2** (unten) Filter bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung **CO** (Central Obstruction) in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche). (**f/inf** = paralleler Strahlengang)

3.4 H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband

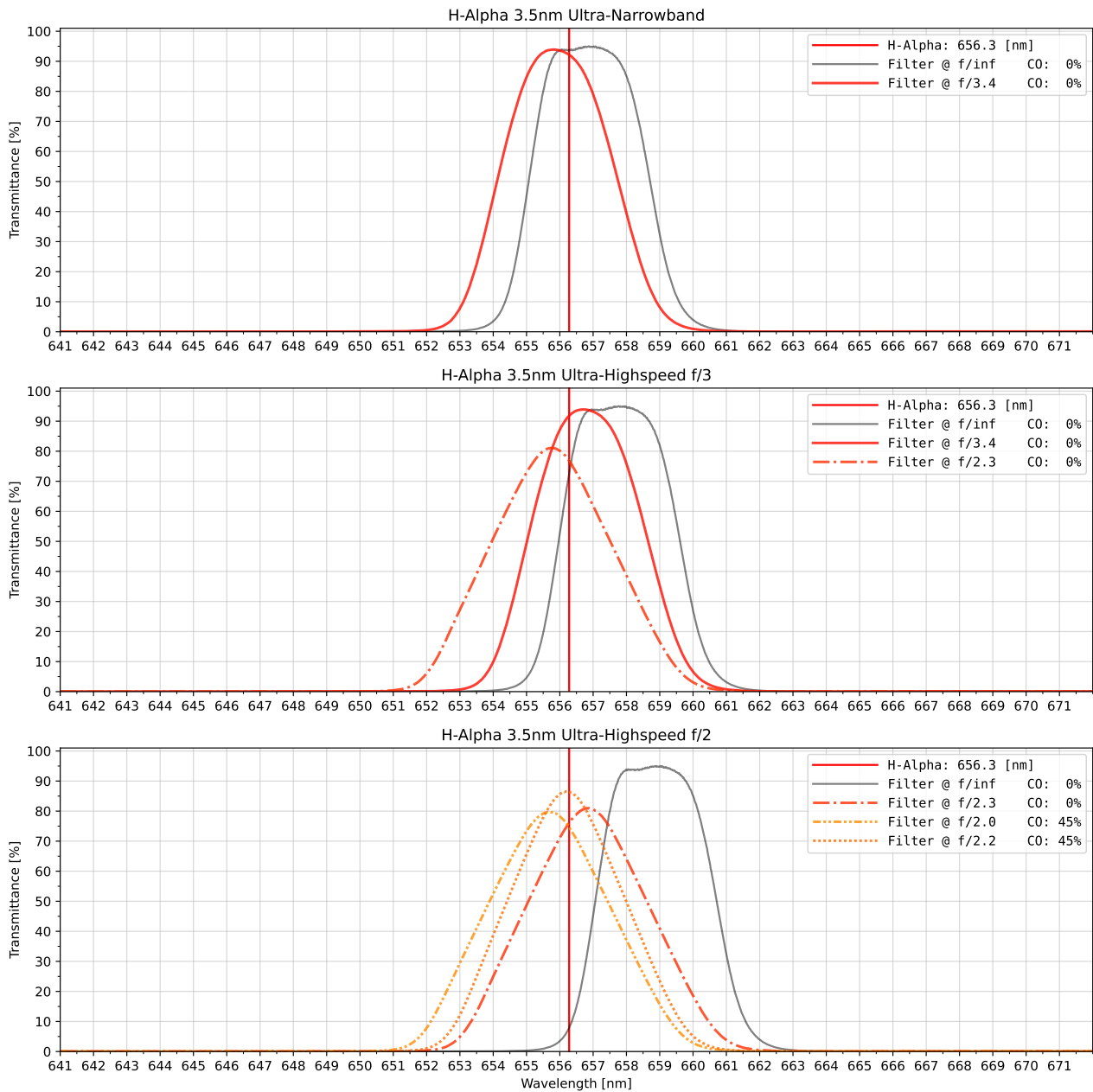


Abbildung 8: Bandpass eines **H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband**, **H-Alpha 3.5nm Ultra-Highspeed f/3** sowie **H-Alpha 3.5nm Ultra-Highspeed f/2** Filters bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung **CO** (Central Obstruction) in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche!). (**f/inf** = paralleler Strahlengang)

3.5 SII 4nm Ultra-Narrowband

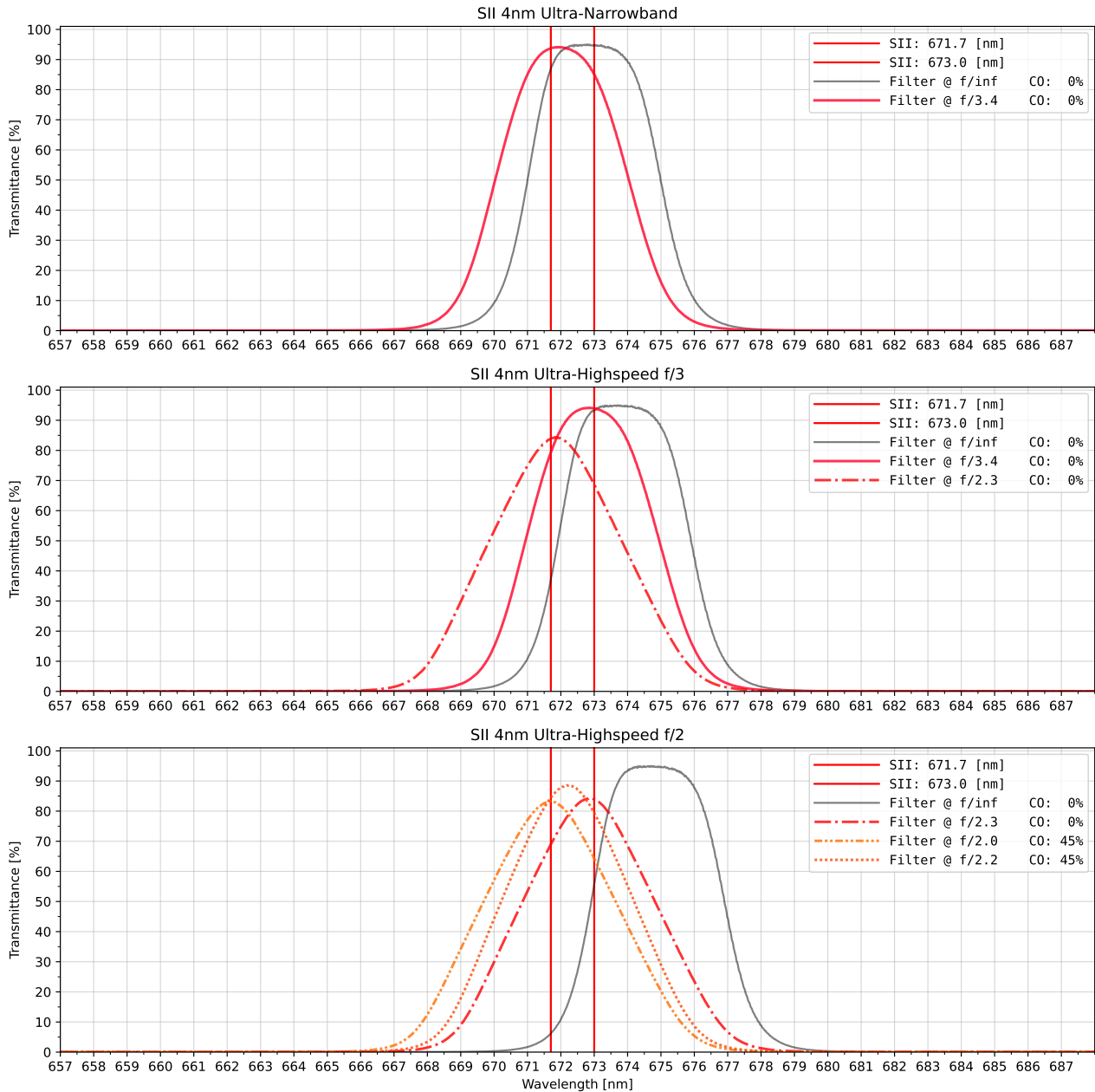


Abbildung 9: Bandpass eines **SII 4nm Ultra-Narrowband**, **SII 4nm Ultra-Highspeed f/3** sowie **SII 4nm Ultra-Highspeed f/2** Filters bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung $CO = (\text{Central Obstruction})$ in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche!). (f/inf = paralleler Strahlengang)

3.6 OIII 4nm Ultra-Narrowband

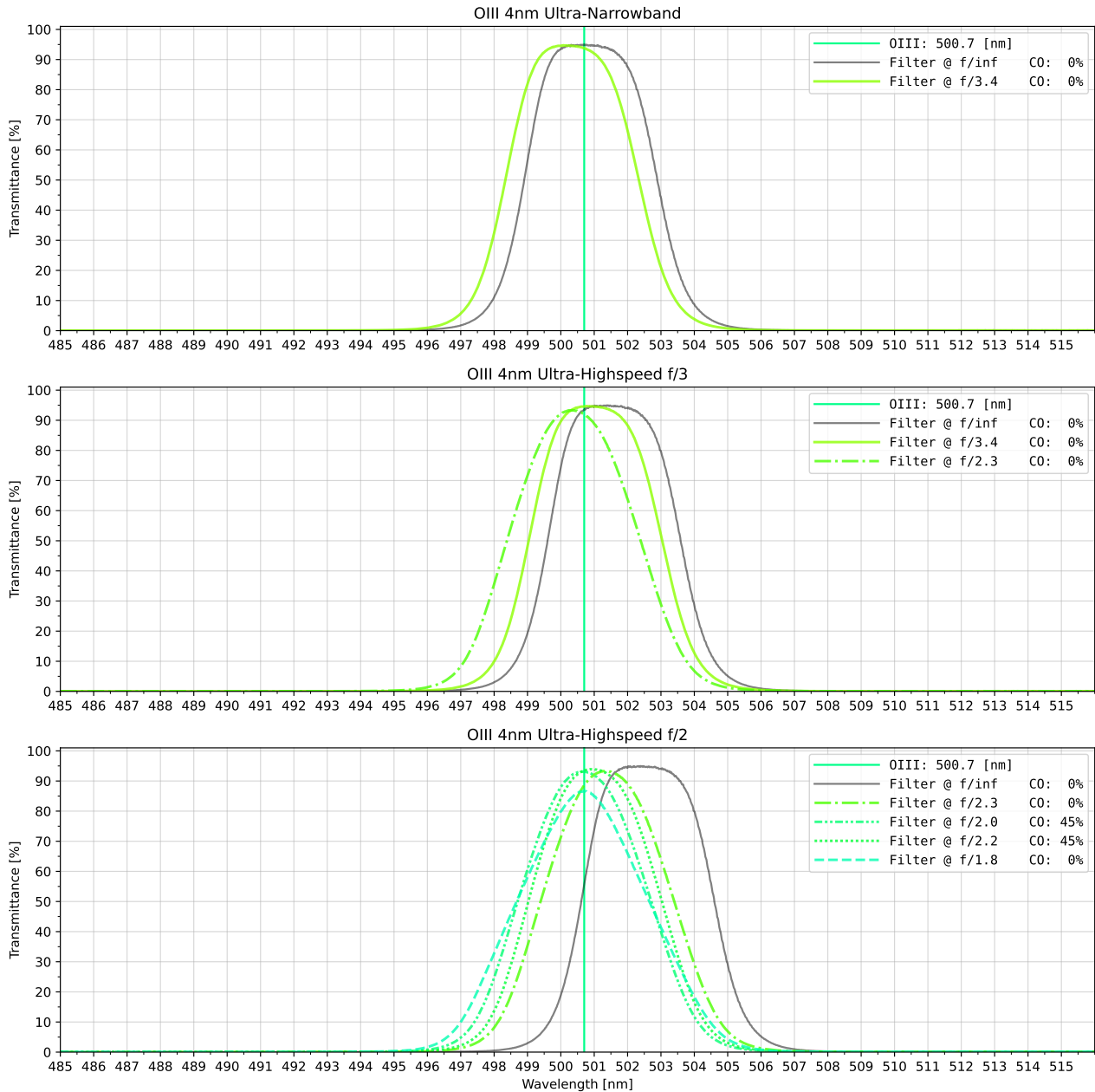


Abbildung 10: Bandpass eines OIII 4nm Ultra-Narrowband, OIII 4nm Ultra-Highspeed f/3 sowie OIII Ultra-Highspeed f/2 Filters bei unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen und zentraler Abschattung CO (Central Obstruction) in Prozent des Öffnungsdurchmessers (nicht der Fläche!). (f/inf = paralleler Strahlengang)

4 Narrowband oder Ultra-Narrowband?

Generell dient die Verwendung von Schmalbandfiltern dem Zweck, das Signal-Rausch Verhältnis (SNR) zu verbessern. Zum Signal-Rausch Verhältnis tragen mehrere Faktoren bei:

Signal	S
Lichtverschmutzung (<i>light-pollution</i> / <i>skyfog</i>)	LS
Dunkelstrom (<i>dark-current</i>)	DC
Ausleserauschen (<i>read-noise</i>)	RN

Tabelle 3: SNR Beiträge

Das Signalrausch-Verhältnis wird durch den Quotienten von Signal (des Objektes von Interesse) durch die Quadratwurzel der Rauschanteile gebildet:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + LS + DC + RN^2}} \quad (4)$$

Das Ausleserauschen wird quadriert, da es vom Hersteller bereits als RMS-Wert (*root-mean-square*), also als Quadratwurzel der Summen der zum Ausleserauschen beitragenden einzelnen Faktoren, angegeben wird.

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, hat man einige Optionen:

Ziel	Maßnahme
SNR direkt verbessern	· Addieren von Einzelbelichtungen (<i>stacking</i>).
Dunkelstrom (DC) verringern	· Kamera kühlen. · Belichtungszeit verkürzen (mittels kleinerem Öffnungsverhältnis).
Ausleserauschen verringern	· Kamera kühlen. · Kamera Einstellungen (Gain, ISO etc). · weniger Einzelbelichtungen Addieren (<i>stacking</i>).
Lichtverschmutzung verringern	· Beobachtungsbedingungen verbessern (Standort, Wetter, Mondphase). · Verwendung von optischen Filtern.

Tabelle 4: SNR verbessern

- Dunkelstrom und Ausleserauschen sind Eigenschaften der Kamera, auf die nur in begrenztem Maße Einfluss genommen werden kann (Kühlung, Belichtungszeiten, GAIN Einstellungen usw.).
- Ein besserer Beobachtungsstandort ist natürlich immer die erste Wahl, jedoch oft nur schwierig zu erreichen.
- Das Addieren von Einzelbelichtungen (sog. *stacking*) ist eine effektive Möglichkeit das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Allerdings ist das Verhältnis von SNR Verbesserung zu Anzahl der Einzelbilder N quadratisch ($SNR \sim \sqrt{N}$). Das bedeutet, dass für eine Verbesserung des SNR um den Faktor 2, 4 Einzelbelichtungen, für eine Verbesserung um den Faktor 4, 16 Einzelbelichtungen notwendig sind usw. Desweiteren geht das Ausleserauschen quadriert für jedes

Einzelbild in die SNR-Berechnung ein. Das bedeutet, dass man zunächst versuchen sollte, so lange wie möglich zu belichten, bevor man die Beobachtungszeit weiter durch die Addition von Einzelbildern verlängert.

- Hier kommen insbesondere die Schmalbandfilter ins Spiel. Sie verbessern das SNR direkt durch das Herausfiltern der uninteressanten spektralen Anteile.

Unabhängig von der Lichtverschmutzung werden mit ihrer Verwendung auch deutlich längere Belichtungszeiten möglich, da der Dynamikumfang der Kamera vollends für das eigentliche Signal ausgeschöpft werden kann. Das verringert wiederum den Anteil des Ausleserauschens beim Addieren von Einzelbildern, da Sie mit weniger Einzelbelichtungen und jeweils längerer Belichtungszeit arbeiten können.

Je schmaler der Bandpass des Filters, desto besser ist das Signal-Rausch-Verhältnis. Der Zusammenhang zwischen Filter Halbwertsbreite und SNR ist jedoch nicht linear. Das Verhältnis des SNR zweier Filter mit unterschiedlicher Halbwertsbreite kann wie folgt für den Spektralbereich des Bandpasses abgeschätzt, werden (Herleitung und Annahmen, siehe Anhang A auf Seite 23).

$$\frac{SNR_{FilterA}}{SNR_{FilterB}} = \sqrt{\frac{FWHM_{FilterB}}{FWHM_{FilterA}}} \quad (5)$$

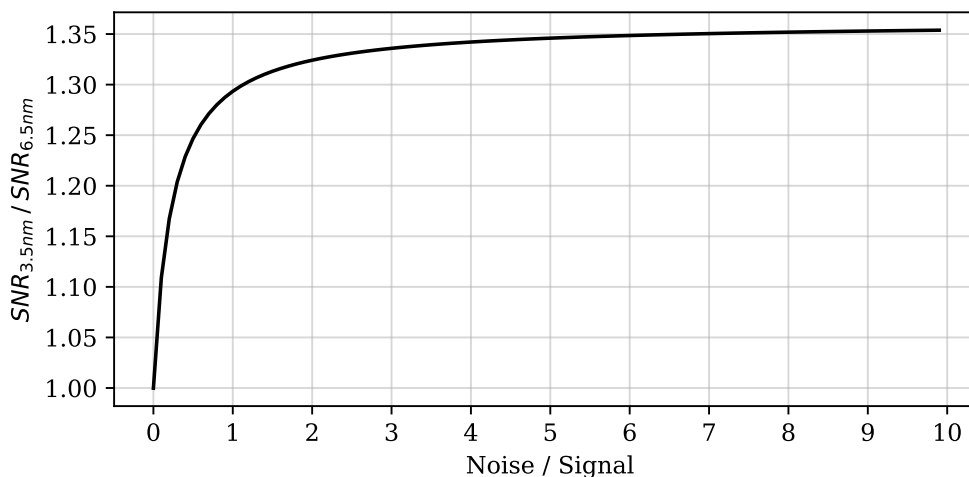


Abbildung 11: SNR Vergleich eines **3.5nm Ultra-Narrowband** (Filter A) zu einem **6.5nm Narrowband** Filter (Filter B): $\frac{SNR_{3.5nm}}{SNR_{6.5nm}}$. Das Verhältnis konvergiert mit zunehmendem Lichtverschmutzung gegen ≈ 1.4 .

Narrowband Planen Sie, den Filter an mehreren Teleskopen mit unterschiedlichem Öffnungsverhältnis einzusetzen, ist der breitbandigere *6.5nm Narrowband* Filter sinnvoll, da er in der Regel an allen Ihren Teleskopen funktionieren wird. In Abschnitt 5 können Sie den optimalen Filter für unterschiedliche Teleskope graphisch bestimmen.

Ultra-Narrowband Besonders bei starker Lichtverschmutzung, bzw. zur Auflösung feinsten Details bei Deep-Sky Aufnahmen, ist der schmalbandigere *3.5nm Ultra-Narrowband* Filter die bessere Wahl.

5 Filterauswahl nach Öffnungsverhältnis und zentraler Abschattung

Wie gezeigt, hat die zentrale Abschattung neben dem Öffnungsverhältnis einen großen Einfluss auf die Blauverschiebung eines Schmalbandfilters. Eine Auswahl des Filters nur nach Öffnungsverhältnis wäre eine Vereinfachung. Die folgenden Abbildungen 15 bis 17 zeigen die Eignung der Verschiedenen Filterkategorien für alle relevanten Kombinationen aus Öffnungsverhältnis und Abschattung. Obwohl die Temperatur eine untergeordnete Rolle spielt und deshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird, ermöglichen die Grafiken die Auswahl des Filters unter weiterer Berücksichtigung der zu erwartenden Durchschnittstemperatur des Beobachtungsstandortes.

Um den optimalen Filter für Ihr Teleskop zu wählen, gehen Sie wie folgt vor:

- Suchen Sie je nach gewünschter Filterwellenlänge die passende Abbildung:

H-Alpha	6.5 nm	Narrowband	Abb. 12 auf der nächsten Seite
SII	6.5 nm	Narrowband	Abb. 13 auf Seite 18
OIII	6.5 nm	Narrowband	Abb. 14 auf Seite 19
H-Alpha	3.5 nm	Ultra-Narrowband	Abb. 15 auf Seite 20
SII	4 nm	Ultra-Narrowband	Abb. 16 auf Seite 21
OIII	4 nm	Ultra-Narrowband	Abb. 17 auf Seite 22

- Wählen Sie den Graphen für die zu erwartende Umgebungstemperatur am Beobachtungsort.
- Wählen Sie ihr Öffnungsverhältnis auf der horizontalen X-Achse.
- Wählen Sie ihre relative Abschattung auf der vertikalen Y-Achse (in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche: $\text{Durchmesser der zentralen Abschattung} / \text{Durchmesser der Teleskop-Öffnung} \times 100\%$. Alle Refraktoren liegen auf der X-Achse da Sie keine Abschattung haben).
- Die Farbe des Bereiches, in den Ihr Teleskop fällt, zeigt Ihnen die optimale Filterkategorie für Ihren Anwendungsfall.

5.1 H-Alpha 6.5nm Narrowband Filter Auswahl

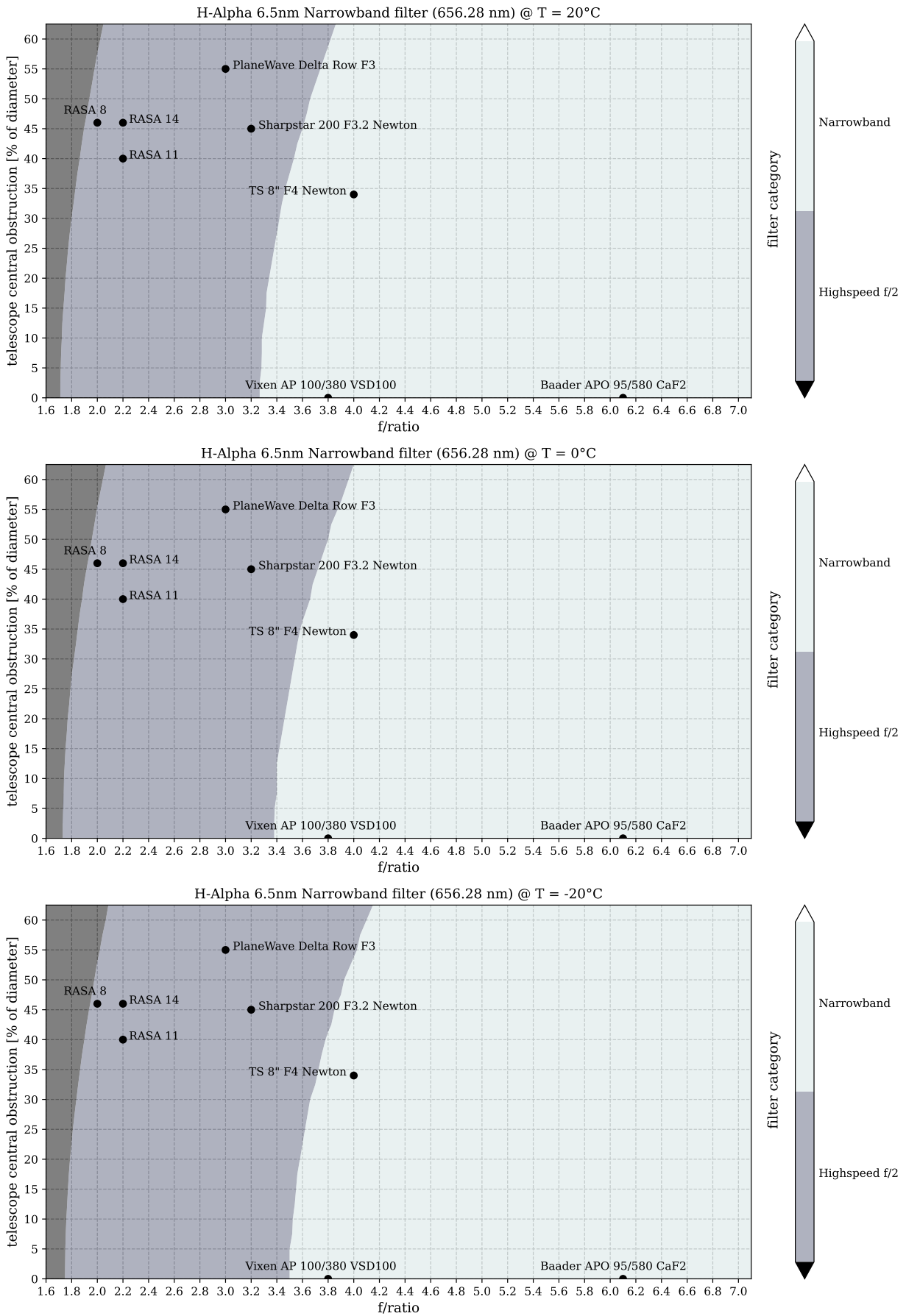


Abbildung 12: Filter Auswahlhilfe für H-Alpha 6.5nm Narrowband Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

5.2 SII 6.5nm Narrowband Filter Auswahl

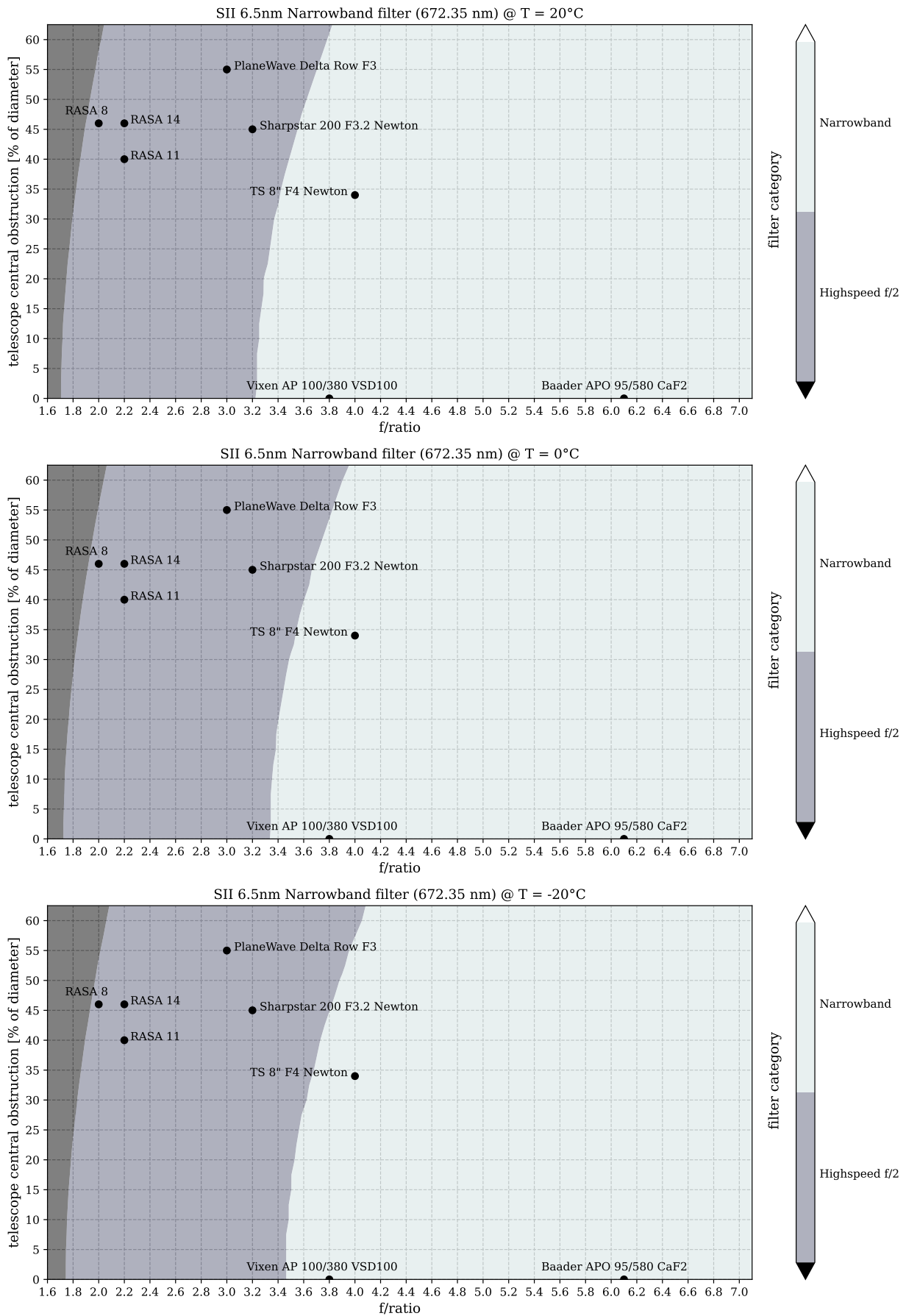


Abbildung 13: Filter Auswahlhilfe für **SII 6.5nm Narrowband** Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

5.3 OIII 6.5nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl

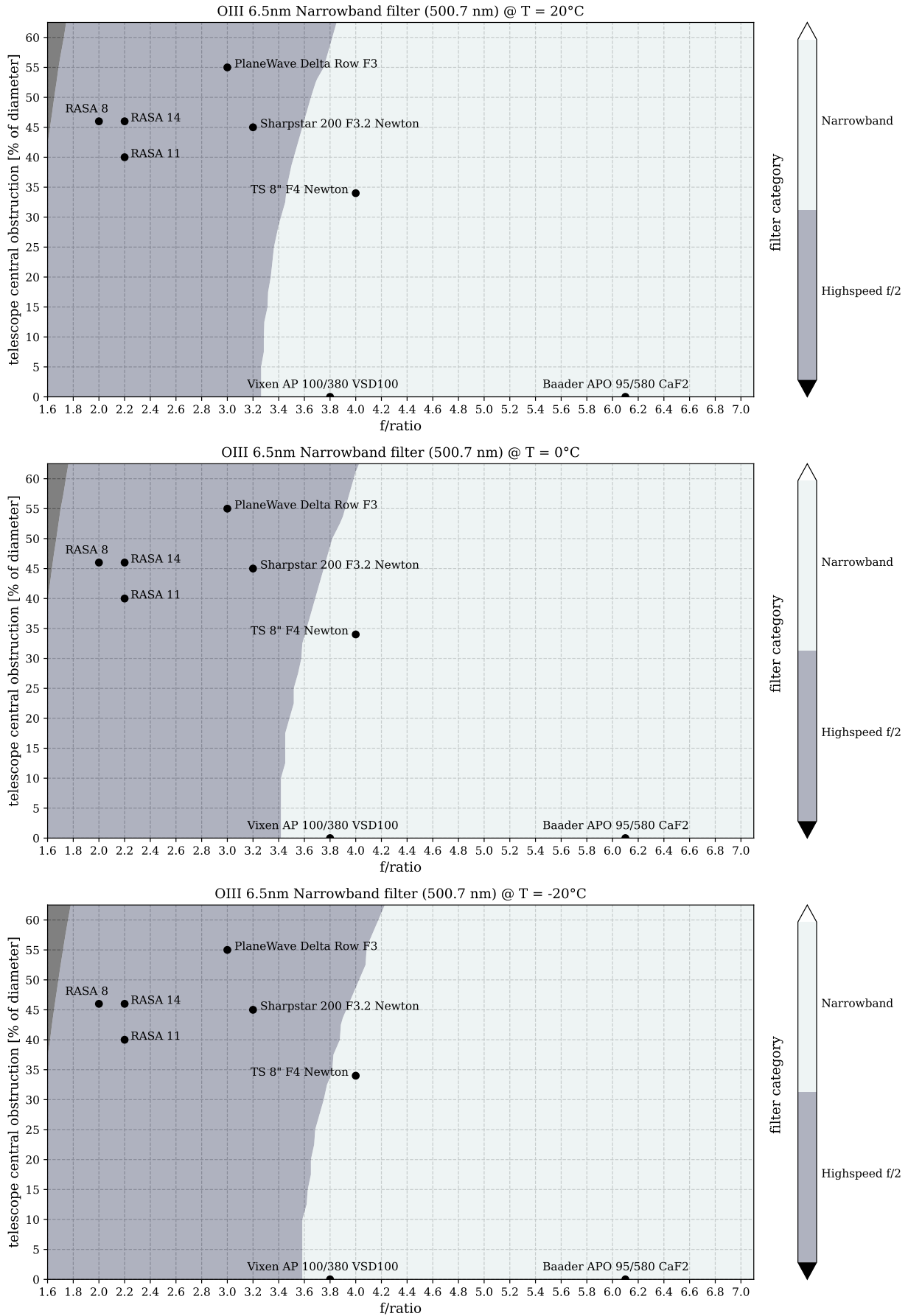


Abbildung 14: Filter Auswahlhilfe für OIII 6.5nm Narrowband Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

5.4 H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl

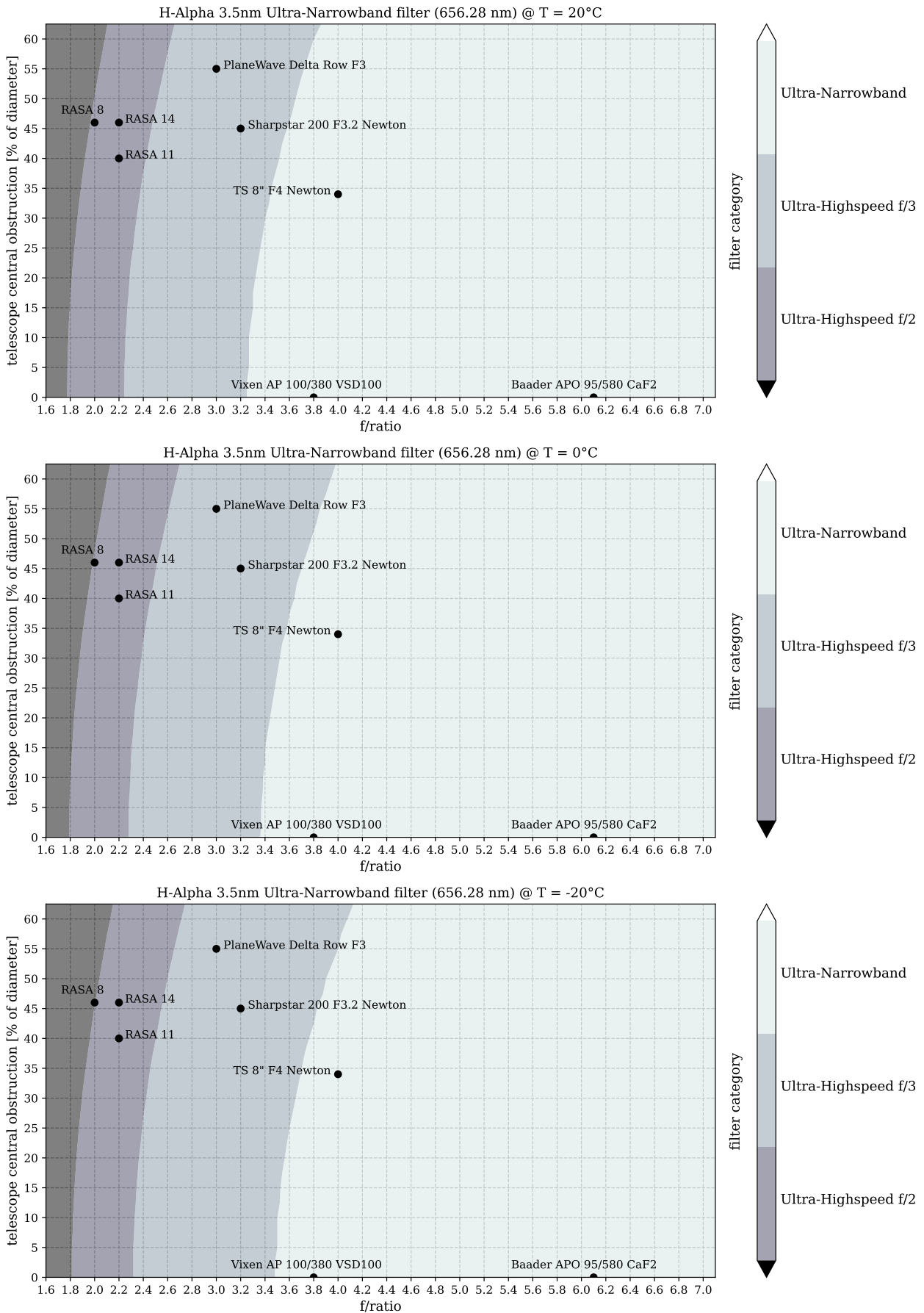


Abbildung 15: Filter Auswahlhilfe für H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

5.5 SII 4nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl

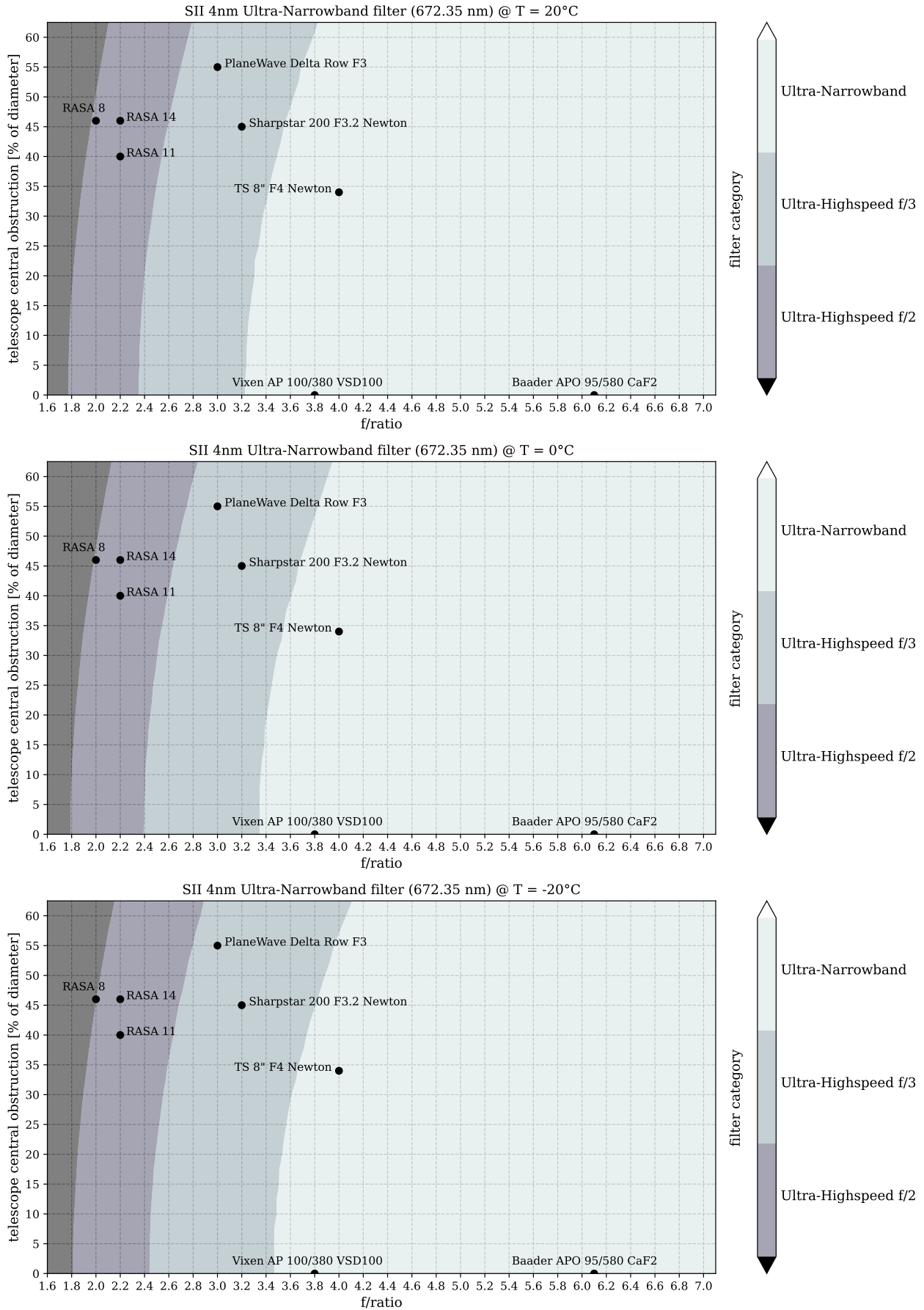


Abbildung 16: Filter Auswahlhilfe für **SII 4nm Ultra-Narrowband** Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

5.6 OIII 4nm Ultra-Narrowband Filter Auswahl

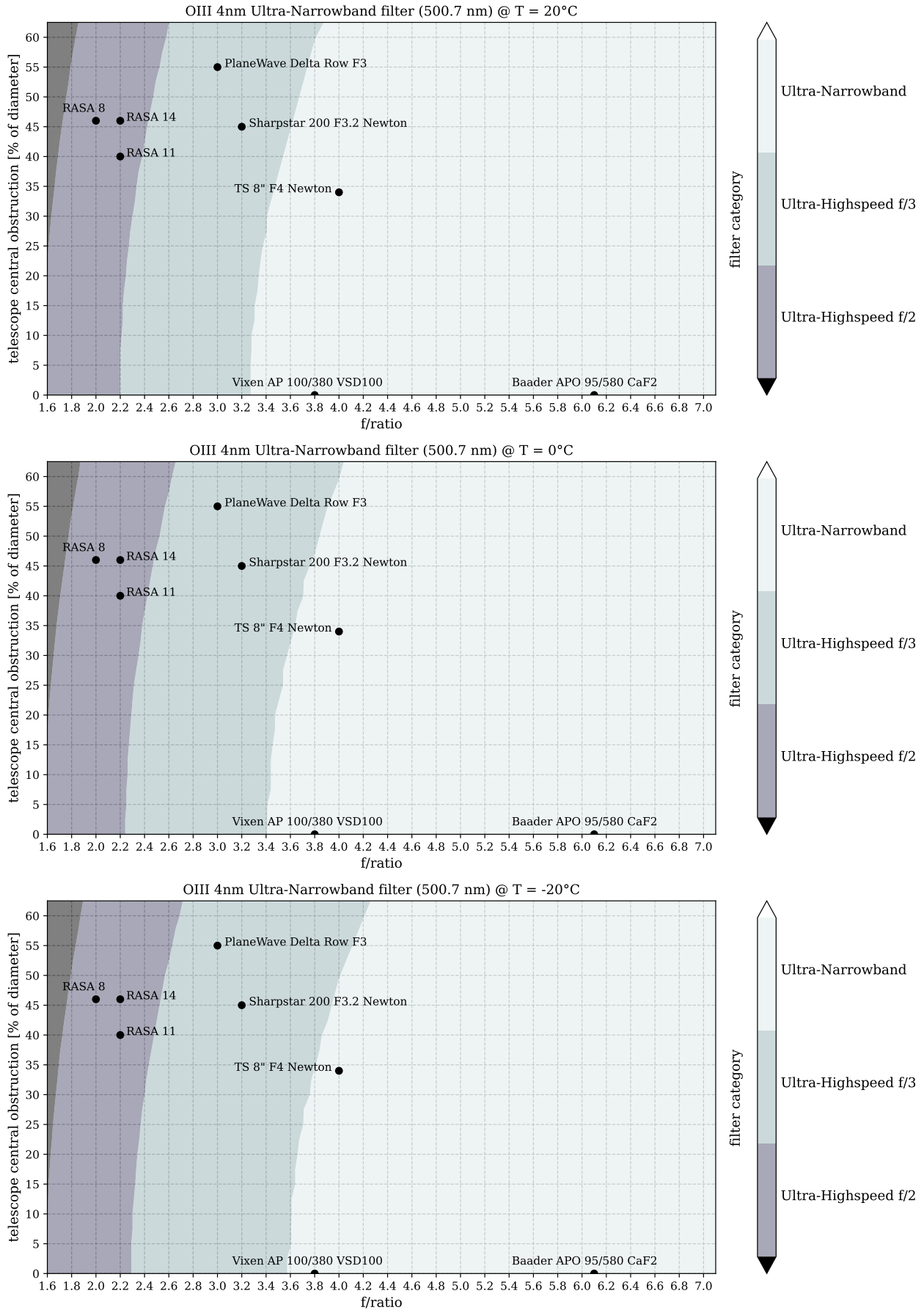


Abbildung 17: Filter Auswahlhilfe für OIII 4nm Ultra-Narrowband Filter bei 20°C, 0°C und -20°C Umgebungstemperatur. X-Achse = Öffnungsverhältnis $f/\#$. Y-Achse = zentrale Abschattung des Teleskops in Prozent des Durchmessers, nicht der Fläche! Die farbigen Bereiche zeigen den optimalen Einsatzbereich der jeweiligen Filter (siehe Legende rechts).

A SNR Vergleich von Schmalbandfiltern

Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses von zwei Schmalbandfiltern unter identischen Beobachtungsbedingungen.

Signal (des Objektes von Interesse)	S
Lichtverschmutzungs-Level (<i>light-pollution</i> / <i>skyfog</i>) bei Wellenlänge λ	$L(\lambda) = const.$
Halbwertsbreite Filter A	$FWHM_A$
Halbwertsbreite Filter B	$FWHM_B$

Annahmen:

- Dunkelstrom(DC) und Ausleserauschen werden vernachlässigt da identisch für beide Filter.
- Die Lichtverschmutzung $L(\lambda)$ wird als konstant für alle Wellenlängen im Bereich des Filterbandpasses angenommen.
- Das Signal wird auf 1.0 normiert.
- Es wird dieselbe Bandpassform für beide Filter angenommen. Das Signal der Lichtverschmutzung kann dann als Signal-Level multipliziert mit der Halbwertsbreite angenommen werden: $LS = L \times FWHM$.

$$SNR_{FilterA} = \frac{S_{FilterA}}{\sqrt{S_{FilterA} + LS}} = \frac{S_{FilterA}}{\sqrt{S_{FilterA} + L FWHM_{FilterA}}} \quad (6)$$

$$SNR_{FilterB} = \frac{S_{FilterB}}{\sqrt{S_{FilterB} + L FWHM_{FilterB}}} \quad (7)$$

Verhältnis der beiden SNR:

$$\frac{SNR_{FilterA}}{SNR_{FilterB}} = \frac{\frac{S_{FilterA}}{\sqrt{1+L FWHM_{FilterA}}}}{\frac{S_{FilterB}}{\sqrt{1+L FWHM_{FilterB}}}} = \frac{S_{FilterA} \sqrt{1+L FWHM_{FilterB}}}{S_{FilterB} \sqrt{1+L FWHM_{FilterA}}} \quad (8)$$

Mit $S = 1$:

$$\frac{SNR_{FilterA}}{SNR_{FilterB}} = \frac{\sqrt{1+L FWHM_{FilterB}}}{\sqrt{1+L FWHM_{FilterA}}} \quad (9)$$

Es zeigt sich, dass das Verhältnis der SNR abhängig vom Level der Lichtverschmutzung ist. Abbildung 18 auf der nächsten Seite zeigt beispielhaft den SNR Vergleich eines **3.5nm Ultra-Narrowband** zu einem **6.5nm Narrowband Filter**:

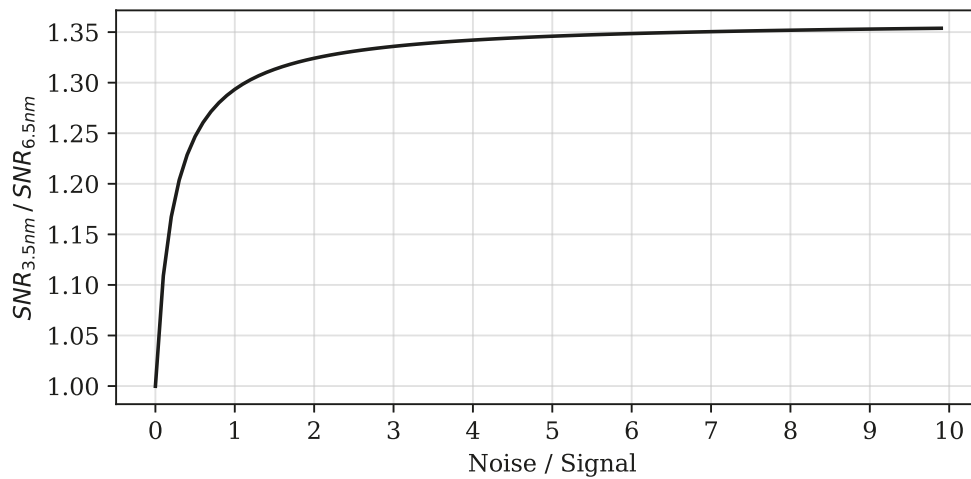


Abbildung 18: Verhältnis der SNRs

Abbildung 19: SNR Vergleich eines 3.5nm Ultra-Narrowband (Filter A) zu einem 6.5nm Narrowband Filter (Filter B): $\frac{SNR_{3.5nm}}{SNR_{6.5nm}}$. Das Verhältnis konvergiert mit zunehmendem Lichtverschmutzungslevel gegen ≈ 1.36 .

Die Wurzelfunktion konvergiert gegen einen Grenzwert:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} f(L) &= \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1 + L \cdot FWHM_{FilterB}}{1 + L \cdot FWHM_{FilterA}}} = \sqrt{\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 + L \cdot FWHM_{FilterB}}{1 + L \cdot FWHM_{FilterA}}} \\ &= \sqrt{\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{L} + FWHM_{FilterB}}{\frac{1}{L} + FWHM_{FilterA}}} = \sqrt{\frac{FWHM_{FilterB}}{FWHM_{FilterA}}} \end{aligned} \quad (10)$$

Im Falle des Vergleichs von **3.5nm Ultra-Narrowband** zu **6.5nm Narrowband** Filter:

$$\frac{SNR_{FWHM=3.5nm}}{SNR_{FWHM=6.5nm}} = \sqrt{\frac{6.5}{3.5}} = 1.363... \quad (11)$$

© Baader Planetarium GmbH

Dieses Dokument sowie die Texte selbst unterliegen unserem Copyright. Kein Teil dieses Dokuments und/oder seiner Formulierungen darf für Zwecke Dritter übernommen werden. Jegliche Vervielfältigung oder Kopie dieses Dokumentes oder Teilen davon und jegliche Veröffentlichung in Printmedien oder in elektronischer Form – auch die Weiterverbreitung dieses Dokuments im Internet zur Information Dritter – ist untersagt. Eine Zuwiderhandlung wird strafrechtlich verfolgt. Änderungen und Irrtümer vorbehalten.



BAADER PLANETARIUM ^{GMBH}
 Zur Sternwarte 4 • D-82291 Mammendorf • Tel. +49 (0) 8145/8089-0 • Fax +49 (0) 8145/8089-105
 www.baader-planetarium.com • kontakt@baader-planetarium.de • www.celestron.de