



## Das **CELESTRON** EdgeHD Teleskop

Ein höchst anpassungsfähiges optisches System für Astrophotographie und visuelle Beobachtung ...  
... zu einem bezahlbaren Preis.

Mit planem Gesichtsfeld und komafreier Abbildung



Zur Strategie und Entwicklung der *Celestron* EdgeHD Optik



2835 Columbia Street  
Torrance, CA 90503  
[www.celestron.com](http://www.celestron.com)

**Autoren: das CELESTRON Entwicklungs Team**  
mit Ergänzungen von Baader Planetarium





Abb.1

Das CELESTRON EdgeHD System (Abb.1) ist eine fortschrittliche und hoch entwickelte Serie von vier Teleskopen. Sie sind gleichermaßen für die visuelle Beobachtung geeignet als auch für die Fotografie mit astronomischen CCD Kameras, Webcams und „Full-Frame“ digitalen Spiegelreflexkameras (DSLR). Diese Broschüre beschreibt die Entwicklungsziele der neuen Teleskopreihe, die Entscheidungen zum Design, die optische Leistung und die praktische Realisierung in der Produktion von 8 bis 14 Zoll Öffnung. Wir stellen Schnittzeichnungen der Teleskope dar, beschreiben Zusatzoptiken und zeigen „Spot Diagramme“ der neuen Teleskopserie im direkten Vergleich zu den klassischen SC Teleskopen und zu dem so genannten „komafreien“ SC System eines bekannten Herstellers. Weiterhin finden Sie

hier Tabellen und Zeichnungen zur Platzierung von Okularen und bildaufnehmenden CCD Sensoren für eine optimale Abbildungsleistung der neuen Teleskopserie. Abgerundet wird die Schrift durch einen Abschnitt zur Fertigung und den verschiedenen Testprozeduren, die jedes Teleskop der EdgeHD Serie durchläuft, bevor es aus der Fertigung in den Versand kommt.

Die Entwicklungsingenieure von CELESTRON in den USA haben die neue Teleskopserie EdgeHD Teleskope getauft. Der Name ist Programm: **HD** steht für High Definition Imaging, also für eine perfekte Abbildung, und das **Edge** steht für die optimale Abbildung innerhalb eines definierten Durchmessers des Gesichtsfeldes bis in die äußersten Bildecken.

## Inhaltsverzeichnis

- 01 Einführung
- 02 Konstruktionsziele für ein modernes Teleskopsystem
- 03 Die Entwicklung des neuen Astrographen
- 04 Die optische Abbildungsqualität der neuen EdgeHD Teleskope
- 05 Mechanische Verbesserungen
- 06 Der Produktionsablauf und die abschließenden Testprozeduren
- 07 Zur visuellen Beobachtung mit einem EdgeHD Teleskop
- 08 Zur fotografischen Beobachtung mit einem EdgeHD Teleskop
- 09 Brennweitenreduzierende Systeme und das HyperStar-System
- A01 Zusammenfassung
- A02 Literaturhinweise + Weblinks
- A03 Glossar

## Anhang

- Spotdiagramme in je drei Farben für die vier EdgeHD Teleskope
- Glossar mit Kurzerläuterung von Fachbegriffen

## 01 - Einführung

Das klassische Schmidt-Cassegrain-Teleskop (SCT) diente einer ganzen Generation von Amateur-Astronomen als universelles Instrument für ihre visuellen- und fotografischen Beobachtungen<sup>1</sup>. Es wurde von Tom Johnson zur Serienreife entwickelt und in großer Stückzahl von CELESTRON produziert. Die Entwicklung und Einführung von Großfeldokularen (mit scheinbaren Gesichtsfeldern von annähernd 100 Grad) und immer größer werdenden CCD-Sensoren für die Bildaufnahme zu Beginn des 21. Jahrhunderts zeigten die optischen Abbildungsgrenzen des klas-

<sup>1</sup> Die Ur-SC-Optik basiert auf dem Schmidt Teleskop von Bernhard Schmidt, welches in den 40er Jahren von J.G. Baker modifiziert und schließlich von T. Johnson zur Serienreife entwickelt wurde.

sischen SC Systems auf. Die steigenden Anforderungen an die optische Abbildungsqualität über ein sehr großes Gesichtsfeld erforderte die Entwicklung eines neuen optischen Systems für den Amateurastronomen.

Die vier Teleskope der neuen CELESTRON EdgeHD Serie (mit 8,- 9.25,- 11- und 14 Zoll Öffnung) garantieren eine perfekte und beugungsbegrenzte Abbildung bei hohen Vergrößerungen an Mond, Planeten und Doppelsternen auf der optischen Achse. Als aplanatischer Astrograph mit einem geebneten, planen und großen Gesichtsfeld liefert das EdgeHD-System absolut runde und scharf fokussierte Sternabbildungen – nahezu beugungsbegrenzt - über einen Durchmesser von 42mm für die Astrofotografie in Schwarz-Weiß, Farbe und/oder Schmalbandfilteraufnahmen von Deep Sky Objekten.

## **02 – Die Entwicklungsziele für das neue EdgeHD Design**

Die Entwicklungsgeschichte der EdgeHD Optik begann mit einer Zielsetzung, die nach langen, kontrovers geführten Diskussionen die folgenden 3 Punkte umfassen sollte. Die neue Optik sollte

- eine hohe optische und mechanische Qualität haben,
- eine gleich bleibend hohe Qualität in der Serienfertigung garantieren, und
- in der Fertigung – und somit auch für den Amateurastronomen – bezahlbar bleiben.

Wie das klassische SC-System von CELESTRON sollte auch die neue Teleskopgeneration leicht und kompakt werden und somit in den Größen von 8 bis 11 Zoll leicht transportabel sein. Für die optische Bildqualität setzten sich die CELESTRON Ingenieure zwei Hauptziele:

- Zum einen sollte die Optik für die visuelle Beobachtung eine beugungsbegrenzte Abbildung auf der optischen Achse liefern. Gleichzeitig sollte sie eine nahezu beugungsbegrenzte Sternabbildung über ein sehr großes scheinbares Gesichtsfeld liefern, wie sie für moderne Weitfeldokulare gefordert wird.
- Zum anderen sollte die Optik für ein sehr großes Gesichtsfeld nahezu beugungsbegrenzte Sternabbildung für die Astrofotografie mit modernen und großflächigen CCD Sensoren liefern (so zum Beispiel für DSLR Kameras und Chipgrößen von 24 x 36mm, die als Full Frame oder Vollformatsensoren bezeichnet werden).

Was die Kosten betrifft, wollten wir dem Amateurastronomen weiterhin einen günstigen, attraktiven Kaufpreis anbieten können, so wie es Celestron über Jahrzehnte mit der Produktion des klassischen SC Teleskops geleistet hat.

**Zusammengefasst** sollte die neue Teleskopgeneration ein sehr flexibles optisches System zu einem bezahlbaren Preis werden.

Hat man einen nahezu unbegrenzten Kostenrahmen des Beobachters zur Verfügung, ist es heutzutage völlig problemlos ein optisches Hochleistungssystem zu rechnen und zu produzieren. Die Herausforderung der CELESTRON-Ingenieure war es jedoch, ein Teleskop zu entwickeln, bei dem die Kosten für Entwicklung und Fertigung mit einer kompromisslosen optischen Qualität in einem bezahlbaren Kostenrahmen in Übereinstimmung zu bringen war.

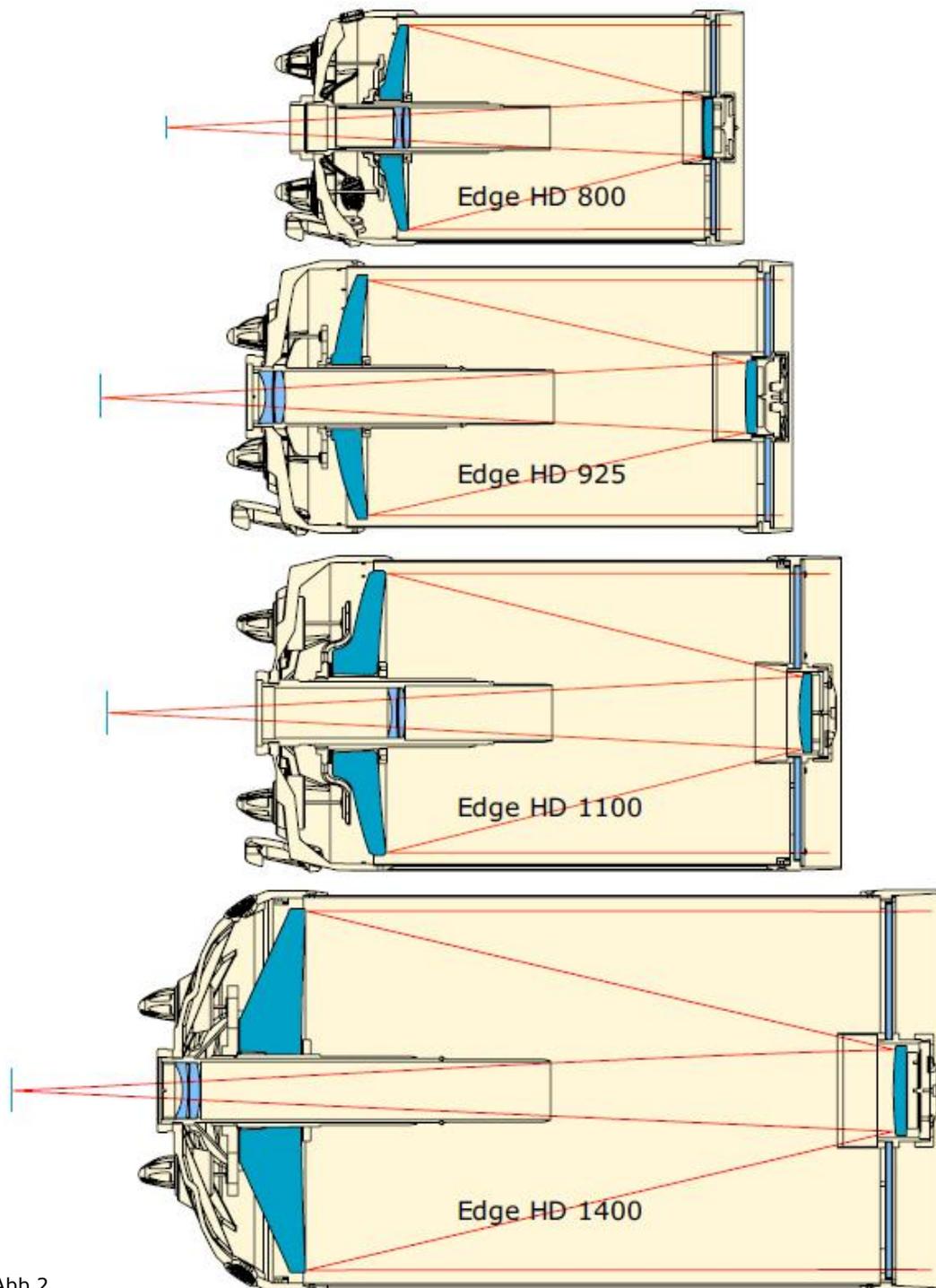


Abb.2

Abbildung 2: Die CELESTRON EdgeHD Serie besteht aus vier aplanatischen Teleskopen von 8-, 9.25-, 11- und 14 Zoll Öffnung und lehnt sich dabei in den optischen Kerngrößen an die klassischen SC Teleskope an. Das optische- und mechanische Design jedes der vier Teleskope ist individualisiert und für eine komafreie und nahezu beugungsbegrenzte Abbildung über das komplette Gesichtsfeld – bei minimalster Vignettierung – von ca. 42mm Durchmesser ausgelegt. Beachten Sie, dass z.B. das Linsenkorrektionsystem im Blendrohr (SkyBaffle) des Hauptspiegels an unterschiedlichen Positionen eingebaut ist (sehen Sie dazu auch die detaillierten Spotdiagramme dieser Publikation).

Wir beginnen diese Beschreibung mit einem umfassenden Rückblick auf das klassische CELESTRON Schmidt-Cassegrain Teleskop und legen die Überlegungen zu möglichen Alternativen dar.

Das klassische SC Teleskop besteht im Prinzip aus drei optischen Komponenten (siehe Abb.3):

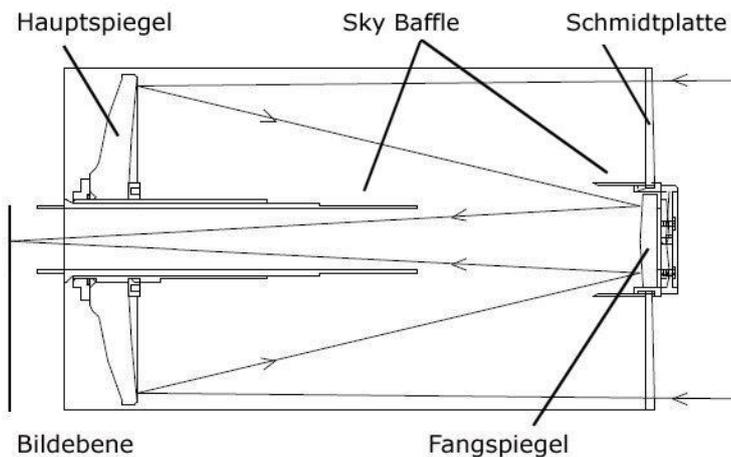


Abb.3

- einem sphärischen Hauptspiegel (HS),
- einem sphärischen Fangspiegel (FS) und
- einer für Licht transparenten Korrektionsplatte (der so genannten Schmidtplatte), die eine aufwändige Oberflächenform hat. Sie hat die Aufgabe, die aus den sphärischen Flächen von HS und FS resultierende Abbildungsfehler zu korrigieren. Für den normalen Betrachter wird die komplizierte Krümmungsform allerdings nicht sichtbar. Sie erscheint wie eine einfache, durchsichtige Glasplatte.

Eine sphärische Oberfläche (Kugeloberfläche) – egal ob nach außen oder nach innen gekrümmt – ist simpel und kostengünstig zu fertigen. Wie jeder Spiegelschleifer aus Erfahrung weiß, entstehen sphärische Flächen automatisch, wenn man zwei Glasscheiben mit einem Überhang regelmäßig übereinander schiebt (dazwischen liegt Schleifpulver) und die beiden Glasblöcke dabei zwischendurch gegeneinander verdreht. So beginnt die Herstellung eines jeden Newton Hauptspiegels. Höchst genaue sphärische Oberflächen entstehen also mehr oder weniger automatisch, und ein erfahrener Optiker in einer gut ausgestatteten Werkstatt ist in der Lage, zuverlässig sphärische Oberflächen in höchster Qualität herzustellen.

Dazu kommt die Tatsache, dass sphärische Oberflächen einfach, zuverlässig und schnell auf Restfehler des Krümmungsradius und/oder auf Zonenfehler zu prüfen sind. Dazu wird ein präzise gefertigtes Gegenstück hergestellt, eine so genannte „Masterplate“. Masterplate und Prüfling werden zum Qualitätstest in direkten Kontakt gebracht, und es werden Interferenzringe (Newtonringe) sichtbar, aus denen ein erfahrener Optiker sofort auf die eventuell vorhandenen Restfehler schließen kann. Dieses Gegenstück – die „Masterplate“ – kann also in der Produktion für beliebig viele Prüflinge eingesetzt werden, sofern der Radius – und damit ihre Brennweite – identisch sind. In der über 40jährigen Produktion der klassischen SC Teleskope beherrscht CELESTRON die „Kunst“, perfekte sphärische Haupt- und Fangspiegel in großer Anzahl, hoher optischer Qualität, beliebiger Brennweite und Größe zu produzieren.

Eine weitere große Stärke von CELESTRON besteht in der Produktion optisch perfekter Korrektionsplatten, die die optischen Abbildungsfehler sphärischer Spiegel korrigieren. Der Gründer von CELESTRON – Tom Johnson – perfektionierte in den frühen 1970er Jahren die dazu notwendigen Bearbeitungstechniken, Produktionsabläufe und die notwendigen Testprozeduren. In den Zeiten davor brauchte es langwierige Arbeitsabläufe von hoch qualifizierten Optikern, um eine solche Korrektionsplatte herzustellen – z.B. wie die für das berühmte 48" Oschin Schmidt Teleskop für den Mt. Palomar. Der „Erfinder“ der Schmidtplatte – der Bergedorfer Optiker Bernhard Schmidt – benötigte für den Schliff der ersten Prototypen zum Bau seiner Schmidtspiegel über ein Jahr.

Die Entwicklung von Johnsons innovativer Herstellungsmethode zum Schleifen, Polieren und Testen einer kostengünstigen Korrektionsplatte haben den „Siegesszug“ der klassischen SC Teleskope in den 70er Jahren hauptsächlich begründet.

### Mögliche Abbildungsfehler eines klassischen SC Teleskops

Für die Leser unter Ihnen, die nicht zu den Optik-Spezialisten zählen, zeigen wir hier eine kurze Beschreibung der optischen Bildfehler, die für ein SC Teleskop relevant sind (siehe dazu auch das Glossar im Anhang dieser Publikation).

#### Off Axis Koma:

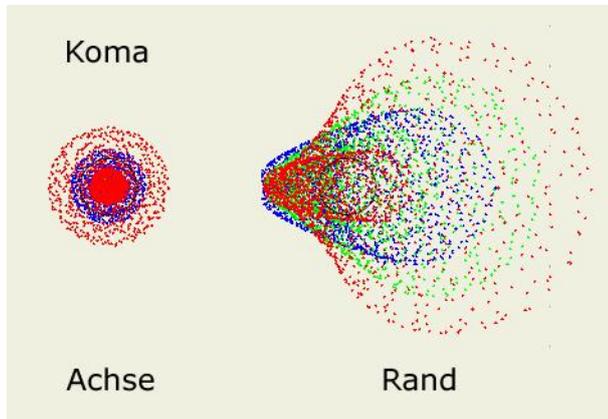


Abb.4

Abb.4: Koma ist ein Bildfehler, der bei einem sphärischen Spiegelsystem außerhalb der optischen Mittenachse entsteht. Die Sternabbildung erscheinen wie kleine Kometen, mit zunehmender „Schweiflänge“ abhängig vom Abstand der optischen Achse.

Auch andere optische Systeme zeigen den Komafehler, so zum Beispiel Newton Teleskope, deren Hauptspiegel eine parabolisierte sphärische Oberfläche hat.

Wie die Graphik zeigt, ist Koma abhängig von der spektralen Wellenlänge des Lichtes (links das Sternbild auf der optischen Mittenachse, rechts am Rand des Gesichtsfeldes).

Abb.5 zeigt den Komafehler (in einer Negativdarstellung) einer echten Sternfeldaufnahme am äußersten Rand des Gesichtsfeldes eines SC.

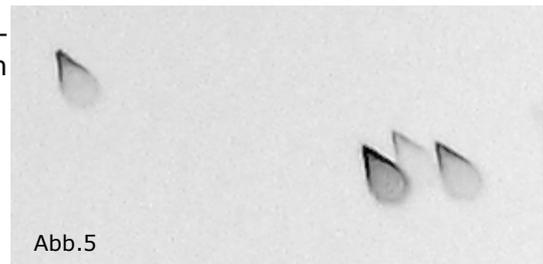


Abb.5

#### Die Krümmung der Bildfeldebene oder Bildfeldwölbung

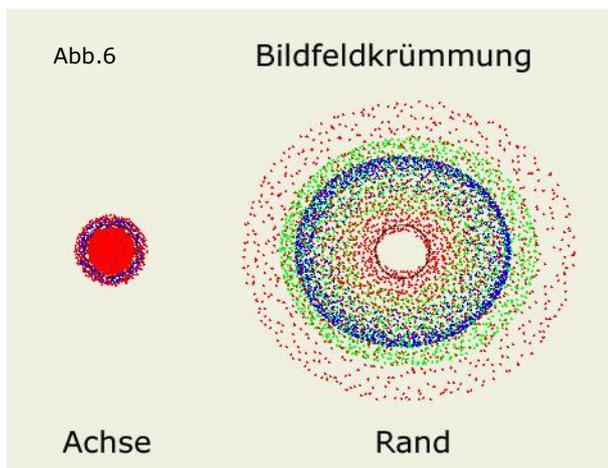


Abb.6

#### Bildfeldkrümmung

Abb.6: Sehr viele optische Systeme (auch die oft so hoch gelobten RC Teleskope) haben eine gekrümmte Bildfeldebene (Fokalebene).

Sie resultiert daraus, dass die bildgebende Optik in Abhängigkeit der Höhe (Distanz zur optischen Achse) der einfallenden Lichtstrahlen leicht abweichende Brennweiten hat. Wird auf einen Stern in der Bildfeldmitte fokussiert, erscheinen die Sterne ausserhalb der Bildmitte mit zunehmendem Abstand immer stärker defokussiert (unschärfer). Fokussiert man auf einen Stern am Bildfeldrand, erscheinen die Sterne in der Bildmitte unscharf. Für ein Teleskop mit einer ebenen (planen) Fokalebene ist der optische Terminus „aplanatisch“, d.h. Sterne sind über

das ganze Gesichtsfeld gleichmäßig scharf abgebildet.

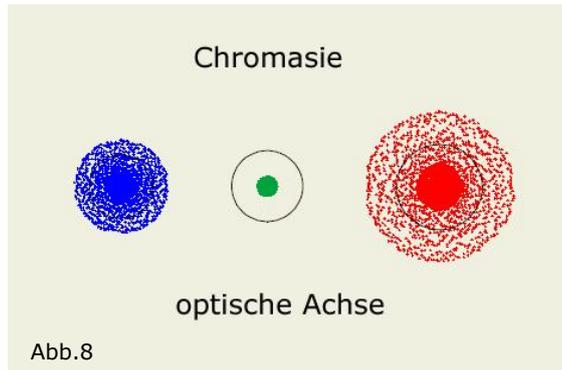
Die Abb.7 rechts zeigt den Effekt der Bildfeldwölbung am echten Sternfeld. Beide Ausschnitte zeigen den äußeren Rand des Bildfeldes. Fokussiert wurde jeweils auf der optischen Achse.

Rechts außen Teleskop mit planer Fokalebene, links daneben Aufnahme mit einem Teleskop mit Bildfeldwölbung.



Abb.7

## Sphäro – oder Restchromasie – Abb.8



Als Sphäro- oder Restchromasie bezeichnet man in der abbildenden Linsenoptik einen Farbrechfehler. Das heißt: Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge (rot, grün, blau) werden nicht in einem Punkt gebündelt. Die Optik hat sozusagen für verschiedenfarbiges Licht unterschiedliche Brennweiten. Teleskope mit reflektierender Oberfläche (auch die sphärischen Spiegel im SC-Teleskop) dagegen sind frei von Restfarbfehlern.

Bei SC Teleskopen entsteht ein sehr geringer Farbfehler durch die schwache linsenartige Brechung in der Korrektionsplatte. Restchromasie ist also bei SC Teleskopen vorhanden, wird aber nur bei sehr großen Teleskopöffnungen oder bei Öffnungsverhältnissen kleiner  $f/8$  visuell oder fotografisch sichtbar. Bei mehrlinsigen Objektiven kann man den Farbrechfehler minimieren, indem man verschiedene Glassorten mit unterschiedlichen Brechungsindizes kombiniert.

Für eine Zeitspanne von fast 40 Jahren erfüllte das klassische CELESTRON SC Teleskop die Bedürfnisse für visuelle und astrofotografische Beobachtung einer ganzen Generation von Amateurastronomen. Es war kompakt bei großer Öffnung und dabei leicht; somit transportabel, preiswert und von hoher optischer Qualität. Die hohe Abbildungsleistung bei einem bezahlbaren Preis basierte grundsätzlich auf der Fähigkeit, hochwertige sphärische Spiegel zu fertigen, aber primär aus der von Tom Johnson perfektionierten Methode, um auch die Schmidt-Korrektionsplatten schnell, kostengünstig und in hoher Qualität in Serie zu fertigen.

In den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts begann die Entwicklung und Markteinführung von optischem und fotografischem Zubehör, die schnell klar werden ließ, dass das klassische SC Design diesen neuen Anforderungen an die erforderliche Abbildungsqualität nicht standhalten konnte. Primär zu nennen sind hier:

- für den visuellen Beobachter Okulare mit immer größer werdenden scheinbaren Gesichtsfeldern bis nahezu 100 Grad und
- für den fotografischen Beobachter die immer größer werdenden hochwertigen CCD-Sensoren mit immer kleiner werdenden Pixelgrößen in astronomischen CCD-Kameras und auch in den immer preiswerteren digitalen Spiegelreflexkameras (DSLR).

### Die Ursachen:

Zum einen zeigt das klassische SC-System außeraxiale Koma. Ein sehr teures Weitwinkelokular zeigt dadurch die Sterne außerhalb der optischen Achse mit Abbildungsfehlern. Beim Kauf einer Vollformat-DSLR kann man den großen Chip nicht nutzen, da die Sterne mit zunehmendem Abstand von der Bildmitte unscharf abgebildet werden, weil die Fokalebene nicht völlig plan ist.

Deshalb war den Celestron Entwicklungsingenieuren rasch klar, dass eine neue Generation von optisch hochwertigen aber trotzdem bezahlbaren Amateurteleskopen entwickelt werden muss, um die hohen Ansprüche zukünftiger Amateurastronomen zu gewährleisten.

### Deshalb sollte eine neue CELESTRON Optik grundsätzlich zwei wesentliche Kriterien erfüllen:

Sie muss

- eine fehlerfreie Abbildung liefern – nahezu beugungsbegrenzt - über ein sehr großes scheinbares Gesichtsfeld und
- die Fokalebene muss absolut plan sein, sodass bis in die Ecken einer Vollformat DSLR Kamera eine gleichmäßig scharfe Abbildung von Sternfeldern ermöglicht wird (Aplanatische Abbildungseigenschaft).

Zusätzlich zu diesen beiden Hauptkriterien gab es noch die Anforderung, dass das große Gesichtsfeld möglichst unvignettiert ausgeleuchtet werden muss.

### 03 - Die Entwicklung eines neuen „Astrographen“

Die Ingenieure bei Celestron haben es sich nicht leicht gemacht, die klassische SC Optik grundsätzlich zu erneuern und radikal zu verbessern. Die beiden preiswert herzustellenden sphärischen Spiegel und die bewährte CELESTRON-Methode zur Herstellung der Korrekptionsplatten erlaubten es, hochwertige Teleskope zu einem optimalen Preis- / Leistungsverhältnis anzubieten. Deshalb sollten bewährte optische Elemente, Produktionsprozesse und optische Testmethoden möglichst in das neue System integriert werden.

Das Entwicklungsteam untersuchte zum Beispiel ausführlich die Vor- und Nachteile zur Entwicklung eines Ritchey-Cretien- (RC) Cassegrain Teleskops. Allerdings überzeugten die Herstellungskosten, die Produktion der erforderlichen hyperbolischen Spiegel und die thermische Instabilität eines offenen Tubus nicht. Hyperbolische optische Oberflächen sind schwierig zu polieren und können nur als Gesamtsystem auspoliert werden. Trotzdem konstruierte und fertigte das Team – in Anlehnung an das RC System – zwei Prototypen eines so genannten Dall Kirkham Cassegrains (CDK) mit einem Korrektorsystem. Die Herstellung und Produktion des parabolischen Hauptspiegels führten jedoch zu einem Teleskop in einer völlig anderen Preisklasse<sup>2</sup>.

Sowohl die Original-RC- als auch die CDK Teleskope sind zwar hochqualitative optische Systeme, aber der 50-jährige Erfolgsgrund der SC Optik – höchster Nutzwert bei wettbewerbsfähigen Herstellungskosten – dürfte nicht kompromittiert werden. Es musste wieder ein kostengünstiges Konzept entstehen, jedoch mit gleich hohen optischen Qualitätsanforderungen wie sie die RC/CDK Teleskope bieten.

Wie oben schon beschrieben war das Hauptziel eine Optik, die sowohl eine komafreie Abbildung über ein großes Gesichtsfeld hat als auch eine absolut plane Bildfeldebene. Nach vielen Überlegungen wurde ein Bildfelddurchmesser von 42mm beschlossen, welcher die obigen Anforderungen erfüllen sollte. Dies ist groß genug für den Vollformatchip einer DSLR Kamera (Bildfelddiagonale 42mm) und mehr als ausreichend für eine DSLR mit APS-C Chip (ca. 22 x 15mm) oder eine preiswertere astronomische CCD Kamera, z.B. die CELESTRON NightScape mit dem Kodak KAF 8300 Chip.

Es gibt mehrere Ansätze, um das klassische SC Design zu modernisieren und es komafrei zu gestalten. Leider führen alle diese Überlegungen zu einer gekrümmten Bildfeldebene. Alle zusätzlichen Änderungen im klassischen Design, um Komafreiheit **UND** eine plane Bildfeldebene zu erzielen erfordern es, entweder dem Fangspiegel (FS), dem Hauptspiegel (HS) (oder beiden) eine von der Sphäre abweichende optische Form zu geben und damit den Aufwand der Produktion, der Prüfung und damit letztlich auch den Preis deutlich zu erhöhen.

Die Lösung, welche schließlich zur Entwicklung des EdgeHD System führte, lag in der Idee, die Vorteile des klassischen SC Designs mit dem Korrektionsystem der CDK-Teleskope zu verbinden. Es wurde ein zweilinsiges Korrektionsystem gerechnet, das in das Blendrohr (die „SkyBaffle“) des Hauptspiegels integriert wird, und das die beiden Fehler des klassischen SC Systems (Koma und Bildfeldkrümmung) für ein Gesichtsfeld von 42mm Durchmesser effektiv beugungsbegrenzt korrigiert. Die sphärischen Spiegel und die Korrekptionsplatte bleiben in diesem EdgeHD Design unverändert und lassen sich so weiter preiswert und hochqualitativ herstellen. Das zusätzliche Linsensystem für die Bildfehlerkorrektur erhöht zwar den Preis – aber nicht in dem Rahmen, der für die Konstruktion eines ähnlich hervorragenden Teleskops mit einem anderen optischen Design erforderlich wäre.

Bedingt durch die mechanische- und optische Grundkonstruktion des klassischen SC-Designs ist die neue EdgeHD Serie zum HyperStar-System der Firma Starizona kompatibel. So lässt sich einfach, schnell und unkompliziert der Fangspiegel aus dem EdgeHD Teleskop entfernen und ebenso

<sup>2</sup> Aus diesen beiden Prototypen und deren Entwicklungsingenieuren entstand übrigens die Firma Planewave, die heute die sehr erfolgreichen CDK Teleskope mit Öffnungen von 14 bis 28 Zoll produziert.

schnell das HyperStar System von Starizona einsetzen. Damit modifizieren Sie Ihr EdgeHD Teleskop in eine digitale Schmidtkamera mit einem Öffnungsverhältnis von  $f/2$  (siehe Seite 27). Und mit den neu entwickelten CELESTRON Fokalreducern (siehe Seite 25) besitzen Sie mit einem EdgeHD Tubus ein Teleskop mit drei wählbaren Brennweiten bei praktisch gleichbleibender optischer Abbildungsqualität.

#### 04 - Die optische Abbildungsgüte der EdgeHD Teleskope

Das optische Design und seine Abbildungsgüte ist immer ein schmaler Kompromiss zwischen folgenden Gewichtungsparemtern:

- der Abbildungsqualität über ein vorgegebenes Gesichtsfeld,
- den optischen und mechanischen Toleranzen in der Fertigung,
- den Produktionskosten,
- der Komplexität der Herstellungsabläufe
- den Anforderungen welche der Beobachter an das Optiksytstem stellt
- wieviel er bereit ist, dafür zu bezahlen

Für das Design der neuen EdgeHD Optik wurde die **Abbildungsqualität auf den ersten Platz gesetzt**. Die Teleskope liefern beugungsbegrenzte Sternbilder auf der optischen Achse und arbeiten beinahe vollkommen beugungsbegrenzt über das gesamte Gesichtsfeld von 42mm Durchmesser. Die Fokalebene ist über die 42mm absolut plan und die Abbildung ist frei vom Komafehler.

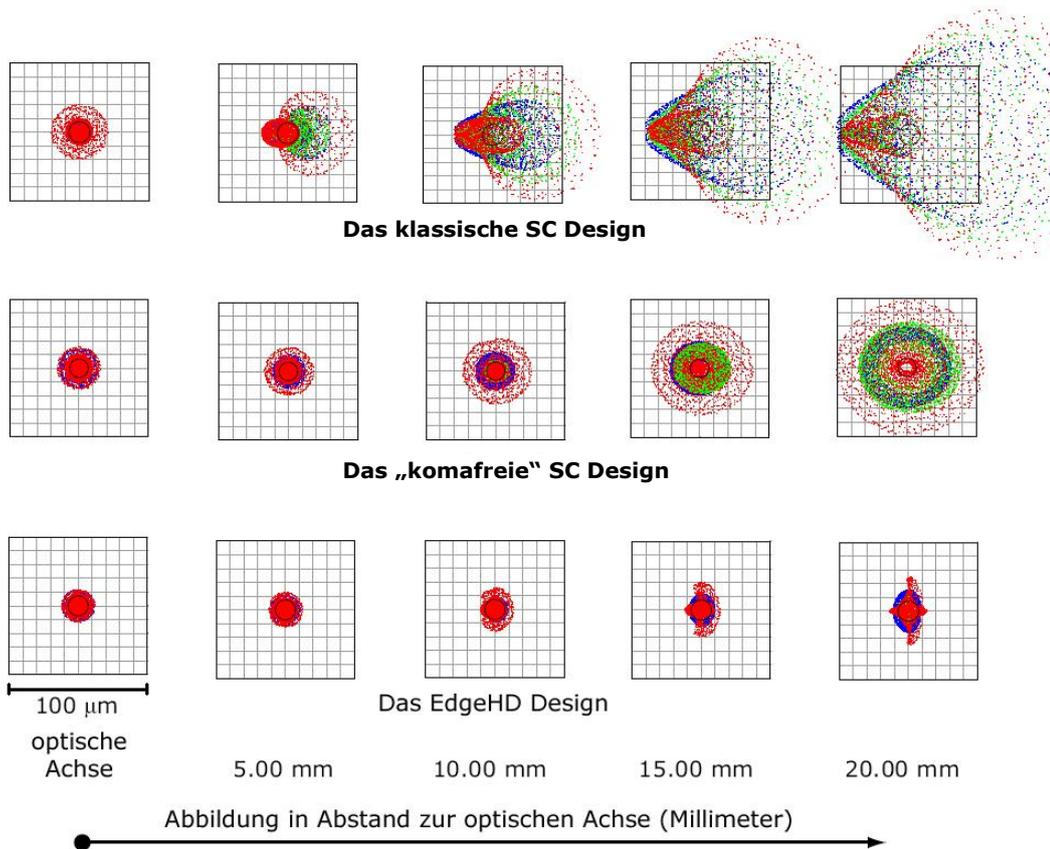
Abbildung 9 auf der nächsten Seite zeigt so genannte Durchstoßdiagramme (Spot-Diagramme, siehe Glossar) für das klassische SC Design (obere Reihe), für das so genannte komafreie System eines Konkurrenten (mittlere Reihe) und für das EdgeHD System (untere Reihe). Alle Spotdiagramme sind für eine Teleskopöffnung von 14 Zoll gerechnet. Zur Berechnung wurde das professionelle Simulationsprogramm ZEMAX<sup>®</sup> eingesetzt.

Jedes einzelne der Spot Diagramme vereinigt die Abbildung eines punktförmigen Beobachtungsobjektes (Stern) in drei Wellenlängen (rot = 656 nm (H-alpha), grün (546 nm) und blau (486 nm) in der Fokalebene der Optik.

Die erste Spalte (von oben nach unten) der Bilder zeigt die Abbildung auf der optischen Achse. Weiterhin sind die Sternabbildungen für vier weitere Positionen mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse dargestellt – für 5 mm, 10 mm, 15 mm und für 20 mm Abstand. Das dargestellte Feld liegt also knapp unterhalb des Gesichtsfeldes der EdgeHD Teleskope von 42mm Durchmesser.

Der kleine schwarze Kreis repräsentiert den Durchmesser des Beugungsscheibchens. Er hat einen Durchmesser von  $14.4\mu\text{m}$  (Radius =  $7.2\mu\text{m}$ ). Werden alle durch die Optik gebündelten Lichtstrahlen zum überwiegenden Teil innerhalb dieses Kreises konzentriert, spricht man von einer beugungsbegrenzten Abbildung oder von einem beugungsbegrenzten Auflösungsvermögen der Optik. Betrachtet man die Abbildungen in der linken Spalte, zeigt sich, dass alle drei Teleskope auf der optischen Achse beugungsbegrenzt abbilden.

Abb.9



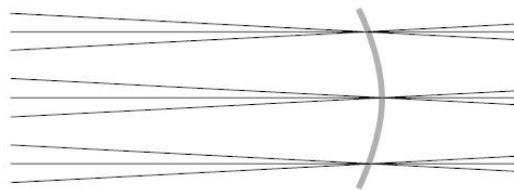
In allen drei Fällen ist die Restchromasie, erzeugt durch die Schmidtplatte, für grünes Licht gleich Null, für rotes und blaues Licht überschreitet der Farbrestfehler minimal den Durchmesser des Beugungsscheibchens (schwarzer Kreis). Der über die drei Farben gemittelte Durchmesser beträgt 10.6 μm. Da das menschliche Auge seine höchste Empfindlichkeit im grünen Spektralbereich hat, empfindet auch ein sehr erfahrener visueller Beobachter das Bild auf der optischen Achse als perfekt.

Die sphärische Abberation ist abhängig vom Öffnungsverhältnis des optischen Systems. Bei den Standardwerten von f/10 klassischer SC Systeme ist dieser Bildfehler vernachlässigbar gering. Steigert man das Öffnungsverhältnis allerdings auf f/8 bis f/6, wächst der Abbildungsfehler auf unzulässige Werte an. Das ist u.a. ein wesentlicher Grund, warum SC-Optiken gleich welcher Konstruktion ein Öffnungsverhältnis um f/10 haben.

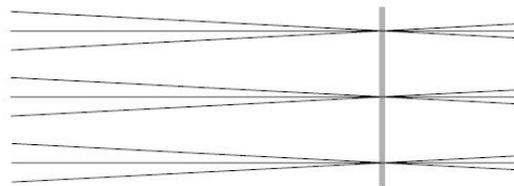
Vergleichen Sie nun die Spotdiagramme der drei Systeme über den wachsenden Abstand zur optischen Achse. Beim **klassischen SC-System** erscheint mit zunehmendem Abstand Koma als ein Effekt der Krümmung der Fokalebene. Beim so genannten **„komafreien“ Teleskop** der Konkurrenz<sup>3</sup> wird zwar in der Tat kein Komafehler sichtbar, aber der Durchmesser der Sternabbildung steigt in Abhängigkeit zum Abstand zur optischen Achse rasant an und erreicht am Rand des 40mm großen Feldes einen Durchmesser von über 100 μm. Dies zeigt sehr deutlich den Effekt einer gekrümmten Bildfeldebene, den das „komafreie Teleskop“ hat.

<sup>3</sup> Bei der Einführung dieses Teleskops wurde das optische Design als RC-Teleskop beworben. Das ist es jedoch nicht, weil nur einer der beiden Spiegel hyperbolisch geformt ist. Nach vielen Protesten wurde die Bezeichnung RC Teleskop zurückgezogen und das System wird fortan als Komafreies Teleskop bezeichnet.

Zum Effekt der Bildfeldkrümmung



Teleskop mit Bildfeldkrümmung



Teleskop mit ebenem Bildfeld

Sternabbildung in der Fokalebene



Abb.10

Abbildung 10 zeigt den Effekt grafisch im direkten Vergleich zwischen einer gekrümmten Bildebene (klassisches SC- und „komafreies“ Design) zur planen Bildfeldebene des EdgeHD Systems. Im „komafreien“ SC Teleskop erscheinen die Sterne am Rand des Gesichtsfeldes „aufgebläht“, weich und unscharf.

Das **EdgeHD System** dagegen zeigt am Rand des Gesichtsfeldes nur leicht vergrößerte Sternabbildungen. Das grüne Licht wird komplett, das rote Licht zum großen Teil innerhalb des Beugungsscheibchens konzentriert, und es ergeben sich gemittelte Sterngrößen von nur 21µm Durchmesser. Dieser Wert ist mehr als akzeptabel für die Abbildung auf dem Vollformat-Chip einer DSLR Kamera oder bei der visuellen Beobachtung mit Ultra-Großfeld Okularen.

Chip einer DSLR Kamera oder bei der visuellen Beobachtung mit Ultra-Großfeld Okularen.

Spotdiagramme zeigen eindrucksvoll, dass die Krümmung der Fokalebene einen sehr schädlichen Einfluss auf die Sternabbildung hat, bezogen auf eine vorgegebene und vergleichbare Feldgröße. In den Abbildungen 11 und 12 wird dies noch einmal deutlich demonstriert.

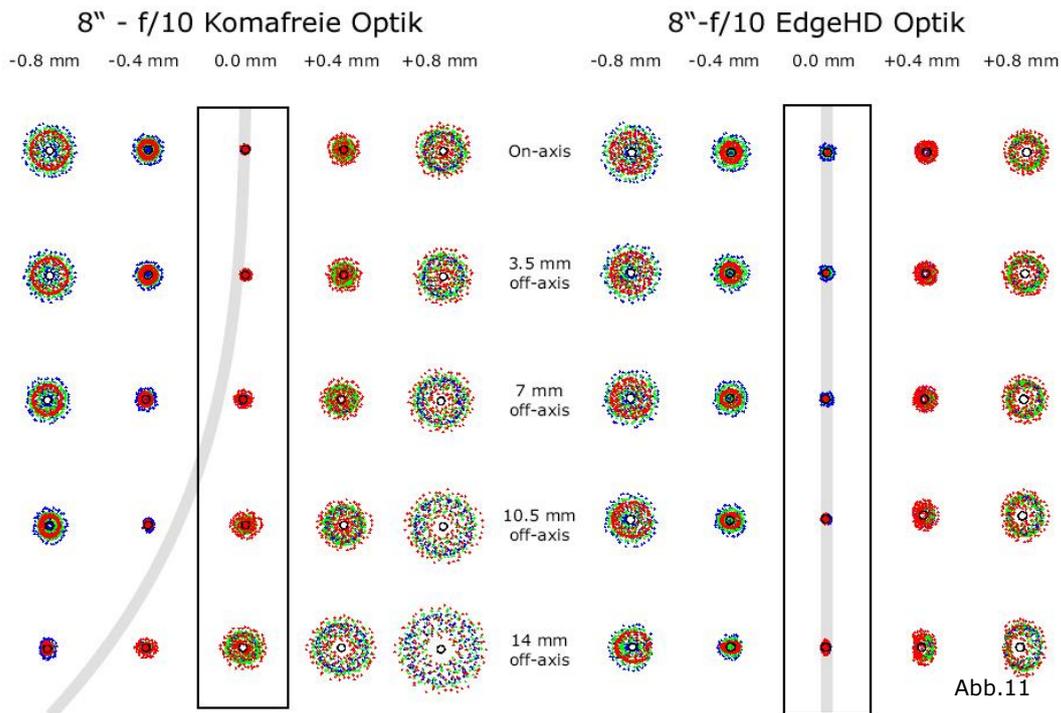


Abb.11

Abbildung 11: Spotdiagramme für ein 8''f/10 „komafreies“ Teleskop im Vergleich zum EdgeHD System (die Fokalebene ist mit einem Rahmen markiert). Die Spot-Darstellungen links und rechts von der Fokalebene zeigen das intra- und extrafokale Bild eines bewusst unscharf eingestellten Sterns. Die Darstellung zeigt folglich, dass bei einer EdgeHD Optik das Bild auch weit außerhalb der Bildmitte beugungsbegrenzt klein bleibt.

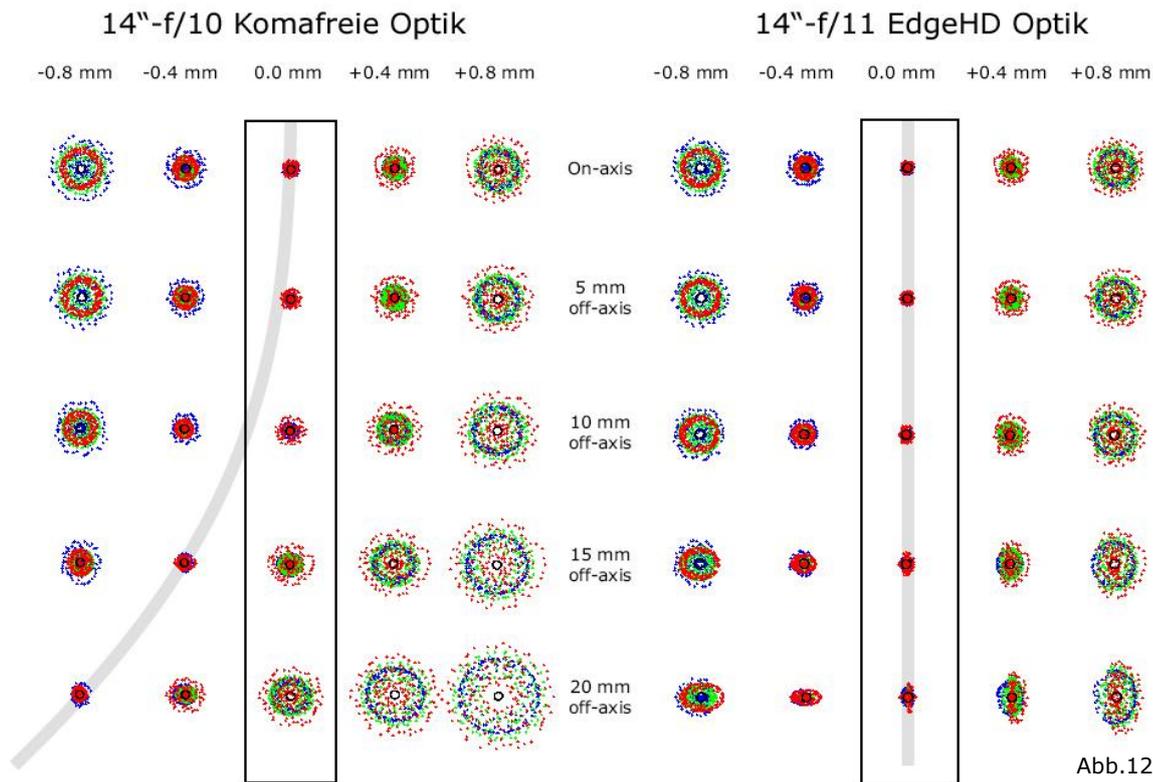


Abb.12: Hier werden erneut die Effekte einer Bildfeldkrümmung, jeweils gerechnet für eine „komafreie“ Optik und das EdgeHD System gegenüber gestellt. Die Spot Diagramme sind jedoch für ein 14" Teleskop dargestellt.

Deutlich wird sichtbar, wie die Sternabbildungen des „komafreien“ Teleskops mit zunehmendem Abstand zur optischen Achse größer werden; je weiter außen sie liegen, desto defokussierter sind sie. Beim EdgeHD (ohne Bildfeldkrümmung) bleiben die Sternabbildungen gleichmäßig fokussiert – im Abstand bis zu 14mm (8" Optik) und bis zu 20mm (14" Optik) zur optischen Achse.

Die Zahl 0.0 in den Diagrammen bezeichnet den Fokus in Bildmitte. Die negativen Zahlenwerte bedeuten, dass die Fokalebene weiter innen (zum Hauptspiegel), die positiven Zahlenwerte bedeuten, dass die Fokalebene weiter außerhalb liegt. Für das EdgeHD System bedeutet dies: fokussieren Sie auf einen Stern in Bildmitte, erscheinen auch alle Sterne am äußeren Rand des Gesichtsfeldes gleichmäßig scharf.

Anders beim „komafreien“ Teleskop. Fokussieren Sie auf einen Stern in Bildmitte, werden die Sternabbildungen mit steigendem Abstand zur Bildmitte immer unschärfer. Das beste, was man hier tun kann, ist auf einen Stern zwischen Bildmitte und Gesichtsfeldrand zu fokussieren. Damit bekommt man gleich bleibend große Sterne, aber das Bild ist über das gesamte Gesichtsfeld leicht defokussiert und die nachweisbare Grenzgröße bei der fotografischen Beobachtung geht stark zurück. Man kann natürlich auch auf die Bildmitte fokussieren und die unscharfen äußeren Bildsegmente in der Bildverarbeitung wegschneiden. Beides ist aber nicht erwünscht.

Wie man hier deutlich zeigen kann, ist es nicht ausreichend ein optisches System komafrei zu konzipieren. Ein Teleskop, welches Spitzenleistungen in der Fotografie und der visuellen Beobachtung erbringen soll, muss sowohl komafrei außerhalb der optischen Achse abbilden, als auch ein geebnetes Bildfeld haben - so wie das CELESTRON EdgeHD Teleskop - und das zu einem bezahlbaren Preis.

## 05 - Mechanische Verbesserungen des EdgeHD Tubus

Um sicherzustellen, dass die hohe Abbildungsgüte des optischen Systems, bestehend aus der klassischen SC Optik und unserem neuem Korrektionsystem auch in der Beobachtungspraxis Bestand hat, wurden auch die mechanische Grundkonstruktion des Teleskoptubus einer grundlegenden Prüfung unterzogen und die Mechanik in entscheidenden Punkten verbessert.

Das klassische SC Teleskop ist aufgrund seiner geschichtlichen Entwicklung so konzipiert, dass die Fokussierung durch eine axiale Verschiebung des Hauptspiegels in Richtung auf den Fangspiegel zu oder von diesem weg geschieht. Dabei wird der Abstand zwischen FS und HS variiert. So lässt sich der Fokus zwischen Unendlich und einem extremen Nahbereich beliebig einstellen. Das hat den Vorteil, dass man mit dem klassischen SC System selbst einige Dutzend Meter entfernte Vögel im Garten oder andere Naturphänomene beobachten und gleichzeitig eine Vielzahl von optischem Zubehör mit fast beliebiger Fokusslage einsetzen kann.

Der große Nachteil dabei ist, dass das klassische SC System – egal von welchem Hersteller – auf einen genau festgelegten Abstand zwischen HS und FS gerechnet wird. Verändert man diesen Abstand (was zum Fokussieren unerlässlich ist), so wird die Abbildungsgüte außerhalb der optischen Achse sofort schlechter, egal ob man den Abstand HS-FS verlängert oder verkürzt. Zudem ändert sich durch die Verstellung des Sollwertes zwischen FS und HS die Teleskopbrennweite deutlich.

Auch das EdgeHD System wird weiterhin über eine Verschiebung des Hauptspiegels fokussiert. Allerdings sind alle Zubehörteile, wie die Ansätze für die visuelle Beobachtung als auch die Ansätze zum Anschluss für eine CCD- oder eine DSLR Kamera für eine festgelegte Fokalebene ausgelegt, um ein Optimum an Abbildungsqualität zu garantieren (siehe dazu auch Seite 22).

Als Teil des „Re-Designs“ wurde der Sollabstand zwischen HS und FS – im Vergleich zum klassischen SC – verkürzt. Zugleich wurden die SkyBaffles (Streulichtschutz) am HS und am FS neu berechnet. Beides war notwendig, um ein möglichst großes, unvignettiertes Gesichtsfeld zu erzeugen. Dies ist essentiell notwendig für die Adaption der HyperStar-Zusatzoptik, welche das EdgeHD Teleskop zum Schmidtspiegel mit Öffnungsverhältnis von  $f/2$  werden lässt. Auch hier ist die Vignettierung ein wichtiger Punkt.

Durch die Optimierung des EdgeHD-Systems auf ein deutlich größeres, fast völlig fehlerfreies Gesichtsfeld sind die mechanischen Toleranzen bei der Montage der optischen Einzelkomponenten in der Fertigung wesentlich geringer als beim klassischen SC-Design.

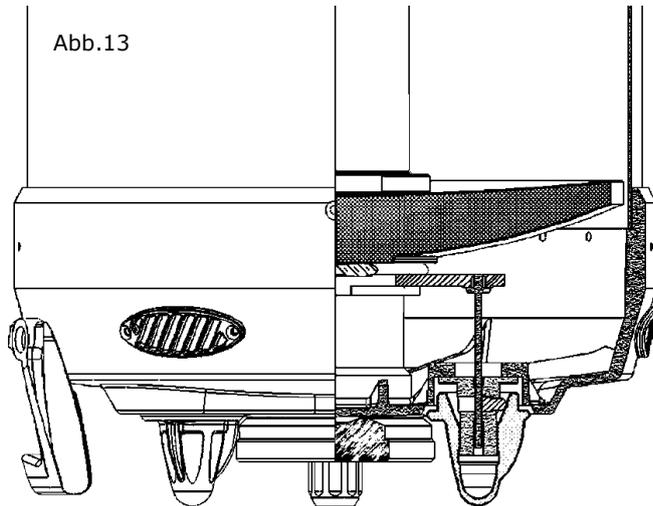
Die optischen Achsen von Hauptspiegel und Schmidtplatte mit dem montierten Fangspiegel müssen wesentlich genauer zueinander zentriert sein als es im klassischen Design notwendig war. Deshalb ist die Schmidtplatte radial zum Tubus - im Gegensatz zum klassischen SC - justierbar ausgelegt und über kleine Inbusschrauben justierbar. Die rotationssymmetrische Justage erfolgt auf einer optischen Bank mit bereits montiertem Hauptspiegel. Nach erfolgter Endjustierung und abschließenden Testprozeduren werden die Madenschrauben mit einem Spezialkleber dauerhaft fixiert. Damit ist gewährleistet, dass die Korrektionsplatte mit Fangspiegel auch nach häufigen Transporten und/oder Stößen in ihrer Sollposition verbleibt.

Auch die Zentrierung des Hauptspiegels erfordert eine höhere Präzision als beim klassischen SC. Hier wurde der HS in einer mechanischen Führung auf dem SkyBaffle zur Fokussierung in Längsrichtung hin- und her verschoben. Da die Führung auf dem Baffle nicht spielfrei konstruiert werden könne, kam es bei einer Umkehr der Fokusrichtung zum so genannten „Spiegelshifting“ – das heißt, der Spiegel kippt in seiner Führung leicht zur optischen Achse. Das hatte im klassischen Design aber kaum eine Wirkung auf die Abbildungsgüte.

Um die hohe Abbildungsgüte der EdgeHD Systeme auch in einer Serienproduktion zu garantieren, wurde auch das Führungsrohr für die Hauptspiegelfokussierung überarbeitet und in seinen mechanischen Toleranzen deutlich reduziert. Während der Montage der EdgeHD Teleskope wird das Spiegelshifting auf einer optischen Bank gemessen. Alle Teleskope mit einem Kippwinkel

größer als 30 Bogensekunden werden aus der Produktion genommen, demontiert und in einen früheren Arbeitsschritt zur Überarbeitung zurückgeführt.

Während eine Verkippung des Hauptspiegels in der Toleranz von kleiner 30 Bogensekunden keinen Einfluss auf die Abbildungsgüte bei der visuellen Beobachtung mit Weitwinkelokularen hat, kann eine Verkippung des Spiegel während der Belichtung eine fotografische Beobachtung „ruinieren“. Bei Aufnahmen von Astrofotos mit langen Belichtungszeiten konnte im klassischen SC unter ungünstigen Umständen der Hauptspiegel verkippen, zum Beispiel bei einer Lageveränderung des Tubus im Laufe der Belichtungszeit. Das hat auf der fertigen Aufnahme zur Folge, dass alle Sterne doppelt abgebildet sind.



Um eine solche Lageveränderung zu verhindern, wurden im EdgeHD Tubus zwei Stahlstangen eingesetzt, die nach erfolgter Fokussierung (die Fokussierspindel dient als ein Lagerpunkt), um 120 Grad versetzt, durch Schrauben von der Tubusrückseite gegen die Fassung des HS drücken und ihn so zwangsweise in seiner Position fixieren.

So kann der Hauptspiegel nicht mehr verkippen. Zur Schonung sind an den Enden der Stahlstangen Kunststoffzapfen aufgebracht. Die Abbildung 13 zeigt eine Schnittzeichnung einer der beiden Spiegelfixierungen.

**Ein Punkt ist hierbei allerdings unbedingt zu beachten. Ist der HS über die Stangen fixiert, darf die Fokussierspindel nicht gewaltsam gedreht werden. Eine mechanische Verbiegung der Präzisionsspindel wäre möglich, zumindest wenn man versucht, den Hauptspiegel zurück zu bewegen.**

Wie oben beschrieben, hat die Fokussierung eines Teleskops über die Verschiebung des Hauptspiegels den Nachteil, dass der Spiegel bei Änderung der Bewegungsrichtung leicht auf der optischen Achse verkippen kann. Natürlich kann man dieses Verkippen der Spiegel durch eine aufwändigere Mechanik – z.B mit radialen Kugellagern – verhindern. Dies erfordert aber einen deutlich höheren Endpreis.

Eine andere Möglichkeit ist natürlich, auf die Hauptspiegelfokussierung generell zu verzichten und den Tubus mit einem spielfrei gelagerten Okularauszug mit großem Durchlass auszustatten. Da modernes optisches Zubehör – ein 2" Superweitwinkelokular kann schon gut und gerne 2kg auf die Waage bringen – und CCD Kameras mit vormontiertem Filterrad immer größer und schwerer werden, müsste ein externer Okularauszug von herausragender mechanischer Steifigkeit und Qualität sein. Auch dies würde den Endpreis deutlich erhöhen.

Die CELESTRON Ingenieure haben deshalb beschlossen, bei der Hauptspiegelfokussierung zu bleiben und das Zubehör – wie auch beim klassischen SC – über die großen und stabilen Außengewinde an der Tubusrückwand zu befestigen. Durch die stabile Verschraubung kann nichts klappern, kippen oder sich verbiegen. Die Außengewinde der 9,25, 11 und 14 Zoll Tuben haben ein 3,3" Außengewinde, die Fokusdistanz hinter dem Gewindeabschluss liegt bei weit ausreichenden 5,75 Zoll (146,05 mm). Bei dem 8" EdgeHD ist es ein 2" Außengewinde und die Fokusdistanz liegt hinter dem Gewindeabschluss bei 5,25" (133,35mm).

Wenn der nur mit einer relativ leichten DSLR Kamera arbeitet, kann er den Hauptspiegel natürlich über die Arretierungsschrauben fixieren und an den Endgewinden einen normalen, guten und stabilen Crayford Auszug zu montieren. Dabei muss aber der Abstand von 5,25- bzw. 5,75 Zoll zur Bildebene eingehalten werden.

Die Firma Baader Planetarium bietet sowohl SteelTrack Crayford Auszüge für SC-Teleskope als auch Anschlüsse für das 3,3" und für das 2" Gewinde mit Übergangsringsen zu fast allen anderen Gewindenmaßen bzw. Steckaufnahmen an. Crayford Okularauszüge sind in der Zubehörsektion 35 zu finden, T2 Zubehör bis hin zu den 3,3" Adptern in den Sektionen 09 und 10.

Ein geschlossener Teleskoptubus (im Vergleich zu einem offenen- z.B. Gitterrohr tubus) muss „atmen“ können. Es muss also ein Luftaustausch zwischen Tubusinnerem und der äußeren Luft möglich sein, sonst kann sich unter ungünstigen Bedingungen Luftfeuchtigkeit als Taubeschlag innen auf die Spiegeloberflächen absetzen. Dies passiert z.B. dann häufig, wenn ein Teleskop aus dem warmen Inneren des Hauses oder einer Wohnung in die deutlich kühlere Nachtluft gebracht wird.

Im klassischen SC Tubus erfolgt dieser notwendige Luftaustausch durch die Öffnung in der Rückplatte mit dem Anschluss für das Zubehör. Von hier kann die Luft durch das SkyBaffle am Hauptspiegel frei zirkulieren. Beim EdgeHD Design ist der Luft dieser Weg versperrt, da das Linsenkorrektionsystem im Inneren des Baffles montiert ist und den Luftaustausch blockiert.

Um im EdgeHD Tubus den notwendigen Luftaustausch zu ermöglichen, werden drei ovale Lüftungskanäle in die Hauptspiegelzelle eingebaut. Die Öffnungen sind mit einem Filter aus rostfreiem Edelstahl mit einer Maschenweite von 60mü bestückt.



Diese Filterung ist eng genug, um Staub- und Schmutzpartikel zu blockieren und trotzdem einen Luftaustausch zu ermöglichen. Zudem erfolgt der Luftaustausch permanent. So ist gewährleistet, dass das Teleskop permanent austemperiert ist, d.h. Lufttemperatur außen = Lufttemperatur innen.

Die Abbildung 14 (links) zeigt die Rückseite eines EdgeHD Tubus mit angesetztem Zenitprisma und Okular. Links im Bild ist eine der Tubusbelüftungen bezeichnet.

Abb.14

## 06 - Der Produktionsprozess der EdgeHD Teleskope

Die Optik des EdgeHD Systems besteht aus 5 optischen Einzelementen

- die asphärische Schmidt-Korrektorplatte,
- ein sphärischer Hauptspiegel
- ein sphärischer Fangspiegel und
- zwei Korrekturlinsen

Die Abbildung unten zeigt die hauptsächlichsten Bauelemente der EdgeHD-Teleskope.

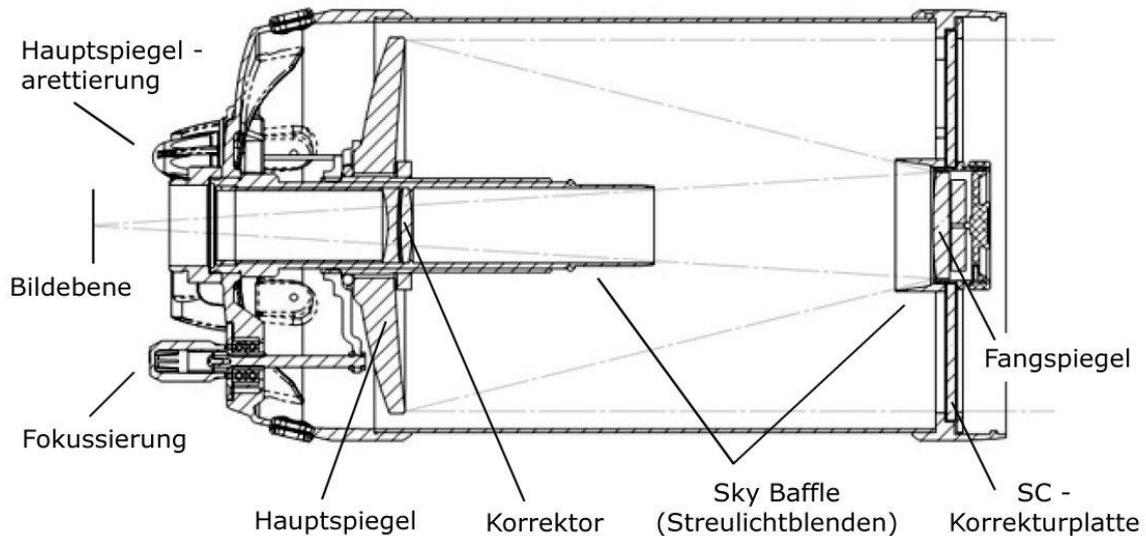


Abb.15

Jedes dieser 5 Elemente muss in engen Toleranzen (Durchmesser, Radius etc.) zu den anderen hergestellt und später mechanisch zueinander montiert werden. Die Firma CELESTRON hat über 40 Jahre Erfahrung in der Herstellung von optischen Einzelkomponenten, im Schleifen und Polieren optischer Oberflächen und in optischen Testprozeduren während der Herstellung der Elemente und deren anschließender Montage. JEDES einzelne EdgeHD-Teleskop, welches das Werk verlässt, wurde während Herstellung der optischen Einzelemente und ihrer Montage immer wieder diversen Tests und Messungen zur Abbildungsgüte unterzogen.

Der Gründer der Firma CELESTRON – Tom Johnson – legte den Grundstock zur Serienproduktion von SC Teleskopen, als er einen einfachen Prozess zur Herstellung der optisch kompliziert geformten Schmidtkorrektorplatte erdachte und perfektionierte (den wir an dieser Stelle aus verständlichen Gründen natürlich nicht näher beschreiben werden). Dieses Produktionsverfahren wurde in den letzten Jahrzehnten weiter entwickelt und verbessert. Daher ist CELESTRON heute in der Lage, Schmidtplatten genau so effektiv und optisch perfekt herzustellen wie die eher simplen sphärischen Haupt- und Fangspiegel.

Die Produktion jeder CELESTRON Schmidt Korrektorplatte beginnt mit einer Rohscheibe mit entsprechendem Durchmesser aus so genanntem „Float-Glas“ (FG). FG ist eigentlich keine Bezeichnung für eine bestimmte Glassorte, wie z.B. Schott BK7 oder Zerodur, sondern bezeichnet eher den Herstellungsprozess des Glases. Das Rohglas selber ist hoch transparentes Feldspatglas mit wenig Eisenanteilen. Das Rohmaterial für eine Schmidt Korrektorplatte soll im Idealfall eine dünne, möglichst planparallele Glasscheibe sein.

Floatglas<sup>4</sup> wird hergestellt, indem man die flüssige Rohglasschmelze in einem großen Tank auf die Oberfläche von flüssigem Zinn ausbringt und dort auskühlen lässt. Die Zinn-Oberfläche ist auf Grund der Gravitation eine annähernd plane Oberfläche mit dem Radius der Erdkugel.

Nach dem Abkühlen werden aus den großen Platten entsprechende Scheiben mit den nötigen Durchmessern ausgeschnitten und anschließend weiter verarbeitet. Die Rohplatten werden optisch geprüft und müssen absolut ohne Fremdkörpereinschlüsse und blasenfrei sein. Beide Oberflächen werden zu den benötigten Formen und Krümmungsradien geschliffen und anschließend auspoliert. Die fertigen Platten werden geprüft und jede Platte, die nicht den erforderlichen Ansprüchen genügt, wird aussortiert. Abbildung 16 zeigt ein Bild während der optischen Prüfung.

Die Kontrolle der optischen Qualität erfolgt über so genannte „Masterplates“ (Prüfschalen). Dies sind im Prinzip Schablonen mit exakt den negativen optischen Flächen der Prüflinge. Werden sie in einen intensiven Kontakt zueinander gebracht (dazwischen dürfen keine Fusseln oder andere Schmutzteile liegen), entsteht zwischen den Flächen praktisch ein Vakuum. Dann werden Interferenzringe (Newtonringe) sichtbar, anhand derer ein erfahrener Optiker sofort auf Restfehler der zu prüfenden Optik schließen kann.

Werden Fehler sichtbar, wird die Korrektorplatte – zusammen im Kontakt mit dem Gegenstück – weiter bearbeitet. Die Korrektorplatte gilt als fertig bearbeitet, wenn nur noch maximal 3 Interferenzringe sichtbar sind. Das entspricht einer Differenz zwischen den beiden Radien von Prüfblock und Prüfling vom ca. 1,5-fachen der Lichtwellenlänge. Die beiden optischen Flächen werden dann vorsichtig voneinander gelöst, und die Korrektorplatte wird anschließend in so genannter Autokollimation in einem Tubus zusammen mit einem fertigen HS und FS geprüft. Dazu wird monochromatisches grünes Laserlicht mit einer Wellenlänge von 532 nm benutzt, weil bei dieser Wellenlänge das menschliche Auge ein Maximum seines Auflösungsvermögens hat.



Abb.16

Autokollimation bedeutet, dass vor der zu prüfenden Optik ein perfekter Planspiegel aufgestellt wird. Das grüne Laserlicht wird okularseitig über einen Strahlenteiler in das zu testende optische Gesamtsystem eingebracht. Es durchläuft die Korrekturoptik im SkyBaffle, trifft auf den FS und wird von dort auf den HS reflektiert. Der HS spiegelt das Laserlicht dann durch die Korrekturplatte auf den Planspiegel. Abbildung 17 auf der nächsten Seite zeigt den Aufbau in Autokollimation.

Der Planspiegel wiederum reflektiert das Laserlicht wieder zurück durch das komplette optische System, und resultierende Abbildungsfehler werden über ein Ronchigitter sichtbar gemacht und durch die Beobachtung durch ein Okular begutachtet.

<sup>4</sup> Floatglas wurde früher von US amerikanischen Herstellern gern als Objektivsonnenfilter, die ja planparallel sein müssen, ohne eine weitere Verarbeitung auf den Markt gebracht. Da die Planparallelität aber nur im Bereich einiger 10er Wellenlängen gegeben war, waren diese optisch kaum brauchbar

## Test eines EdgeHD Tubus in Autokollimation

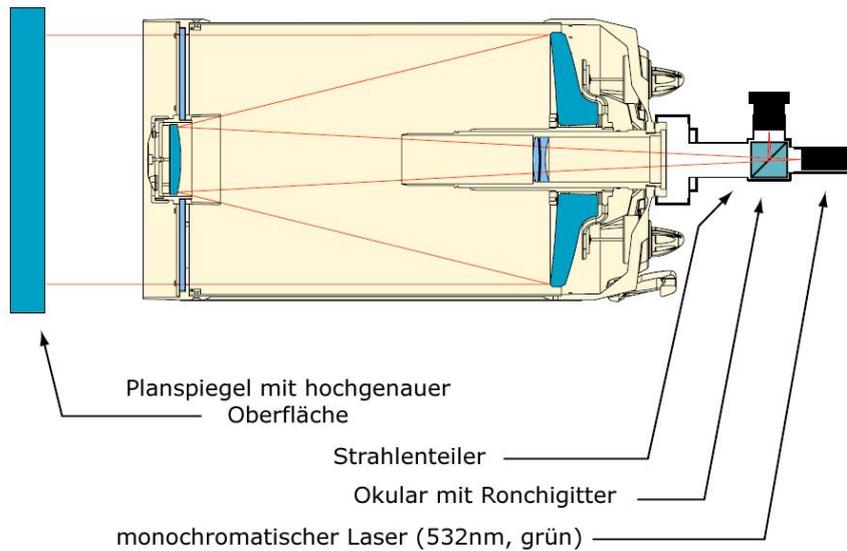


Abbildung 18: Testaufbau in Autokollimation

Der Vorteil der Autokollimation ist der, dass das Laserlicht den kompletten Strahlengang im EdgeHD System doppelt durchläuft und somit resultierende Abbildungsfehler doppelt so groß sichtbar werden. Bei der Betrachtung der Krümmung der Linien des Ronchigitters durch ein Okular kann ein erfahrener Optiker sofort erkennen, ob die Schmidtplatte noch einmal überarbeitet werden muss, oder ob sie die hohen optischen Anforderungen für ein EdgeHD-Teleskop

erfüllt.

Die Rohlinge der Hauptspiegel bestehen aus gepressten Scheiben von Borsilikatglas mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die zähflüssige Glasmasse wird in eine Form gepresst. Dabei bekommt sie schon grob den erforderlichen Krümmungsradius, und das Loch im HS wird ebenfalls eingebracht. Anschließend werden die Scheiben temperaturgesteuert abgekühlt, um Spannungen in den Glasblöcken zu vermeiden.

Anschließend werden die Scheiben mit entsprechenden Gegenstücken und immer feiner gestuftem Schleifpulver geschliffen. Dann werden sie poliert, bis der Krümmungsradius der sphärischen Form, die erforderliche Primärbrennweite und die auspolierte Oberflächengüte erreicht ist. Geprüft wird ähnlich wie bei der Korrektorplatte beschrieben, indem Prüfling und eine Masterplate in direkten Kontakt gebracht werden, so dass Interferenzringe sichtbar werden.

Wenn Radius und sphärische Form mit den Spezifikationen übereinstimmen, werden die Hauptspiegel anschließend noch auf der optischen Bank auf die Rauheit der Oberfläche überprüft. Dabei wird interferometrisch geprüft, ob die Oberfläche fein genug auspoliert ist.

Ein Spiegel kann von der Brennweite und seiner Oberflächenform noch so perfekt geschliffen sein – wenn seine Oberfläche zu rau ist, wird sie nur „matschige“ Sternabbildungen produzieren.

Abbildung 18 (rechts) zeigt die optische Bank mit einer größeren Anzahl von Hauptspiegeln vor der interferometrischen Prüfung.



Die Produktion der Fangspiegel entspricht im Prinzip der eben beschriebenen Methode der Hauptspiegel, wobei die Oberflächenform im Gegensatz zum Hauptspiegel natürlich konkav (erhaben) gekrümmt ist. Auch das Glasmaterial ist identisch, ebenso die Prüfmethode im Abschluss des Produktionsprozesses.

Wie schon öfter in diesem Artikel erwähnt haben wir uns bei der Entwicklung der EdgeHD Optik entschlossen, die sphärischen Oberflächenformen von HS und FS der klassischen SC Teleskope beizubehalten. Ausschlaggebend war unsere über 40jährige Erfahrung in der Herstellung solcher Spiegel, durch die wir sie preiswert herstellen und präzise auf optische Restfehler prüfen können.

Die „komafreien“ Teleskope mit der hyperbolisch gekrümmten Oberfläche des Fangspiegels sind schwieriger und ungenauer auf Restfehler zu prüfen, und letztendlich haben sie eine gekrümmte Fokalebene, die wir für die Konzeption des EdgeHD System unbedingt vermeiden wollten.

Der Herstellungsprozess der Linsen für die Korrektionsoptik entspricht der Methode, mit der auch hochwertige Refraktorobjektive hergestellt werden. Basisglasmaterial sind für die Korrektorlinsen der 8,- 9,25- und 11 Zoll Geräte die Schott Gläser N-SK2 und K10. Für die 14" Korrektoren werden die Schott Rohgläser N-SK2 und N-BALF2 eingesetzt.<sup>5</sup>

Um eine gute Homogenität des Rohglases zu garantieren – es dürfen ja in einer Optik, die von Lichtstrahlen durchlaufen wird, keinerlei Blasen oder Dichteinhomogenitäten vorhanden sein – werden die Rohlinge nur in kleinen Mengen und in den benötigten Durchmessern hergestellt. Dabei wird das zähflüssige Glas in Formen stranggepresst. Nach dem temperaturgesteuerten Abkühlen der Rohscheiben werden sie mit einem diamantbesetzten Hohlbohrer auf den exakten Durchmesser der SkyBaffles geschnitten. Anschließend werden sie geschliffen und poliert. Auch die Linsen der Korrektionsysteme werden gegen eine Prüfoptik getestet.

Es erfolgt nun ein endgültiger Test auf einer Montagebank, die aber im Prinzip der optischen Bank, mit der auch die optischen Einzelteile geprüft werden, gleicht. Hauptspiegel und Korrektionsplatte werden in eine Mechanik eingespannt und dem System wird nun ein bestimmter Fangspiegel zugeordnet. Als Linsenkorrektionsystem kommt eine „Master Optik“ zum Einsatz. Der – dem Gesamtsystem – zugeordnete Fangspiegel wird in den Aufbau eingebracht und die optische Prüfung des Gesamtsystems erfolgt ebenfalls in Autokollimation zur genaueren Fehleranalyse.

Abbildung 19 zeigt die Handretouche (Nacharbeitung) eines Fangspiegels

Ein erfahrener Optiker prüft nun das Gesamtsystem auf Restfehler mit dem Verfahren des Foucault Test. Dieser Test ist sehr empfindlich, noch dazu wenn er in Autokollimation durchgeführt wird. Er macht z.B. Zonenfehler, Über- oder Unterkorrektur von HS und/oder FS, abfallende oder erhabene Ränder der Spiegel oder Beulen im Test als Schatten sichtbar.



Abb.19

<sup>5</sup> Die Glassorten haben unter anderem unterschiedliche Brechungsindizes. Durch Kombination von Gläsern unterschiedlicher Brechungsindizes wird erreicht, dass rotes, grünes und blaues Licht gleichermaßen in einem Brennpunkt gebündelt werden. Somit entstehen keine oder nur unbedeutende Restfarbfehler, denn das Licht durchläuft die Gläser und wird nicht nur an der Oberfläche reflektiert

Zeigt die Gesamtkombination nicht tolerierbare Restfehler, werden diese als Muster auf den Fangspiegel übertragen. Der Fangspiegel wird dann in Handarbeit optisch überarbeitet (siehe Abbildung auf Seite 19, unten).

Nach einer eventuell notwendigen Überarbeitung des Fangspiegels werden die Sets wiederum geprüft. Zeigt der Foucault-Test keine weiteren intolerablen Fehler, werden die Sets noch an einem künstlichen Stern geprüft. Hierbei wird verifiziert, ob die Extra- und Intrafokalen Sternbilder gleichmäßig erscheinen.

Anschließend werden die Sets der optischen Elemente in die CELESTRON-eigene Bedampfkammer gebracht. Die Oberflächen der Korrekturoptik (Schmidtplatte und Korrekturlinsen für den Einbau ins Baffle) werden entspiegelt und vergütet, um Lichtreflexionen an den Oberflächen zu minimieren. HS und FS bekommen die hoch reflektierende Aluminiumbedampfung mit einer darüber aufgedampften Schutzschicht aus Quarz.

Jetzt werden die zusammen gehörigen Sets im Tubus montiert. Es erfolgt ein letzter **visueller Test**, der bei CELESTRON der „Visual Acceptance Test“ genannt wird und der durch den so genannten „QA Inspector“ durchgeführt wird. Auf gut Deutsch wird durch einen erfahrenen und hoch qualifizierten Optiker ein visueller Test am fertig im Tubus montierten Gesamtsystem durchgeführt.

Dieser Test erfolgt in einem thermoklimatisierten Reinraum. Dabei wird grünes monochromatisches Laserlicht auf einen weit entfernt stehenden, optisch perfekten Parabolspiegel gelenkt. Der reflektierte Laserstrahl aus parallelem Licht wirkt wie ein künstlicher Stern und wird vom QA Inspector durch ein hoch vergrößerndes Okular kritisch betrachtet. Um ein komplettes EdgeHD Teleskop aus der Produktion zur letzten Prüfung zu überführen, muss dieser Test folgende Kriterien erfüllen:

- Die Abbildung des künstlichen Sterns im Fokus darf nur einen einzigen Beugungsring zeigen. Das Bild muss rund und gleichmäßig sein, und kein Streulicht außerhalb des Beugungsringes ist zulässig
- Die Beugungserscheinungen des künstlichen Sternbildes außerhalb des Fokus (sowohl Intra- als auch Extrafokal) müssen rund und gleichmäßig hell erscheinen.
- Bei der visuellen Betrachtung eines Ronchigitters mit einer Auflösung von 150 Linien auf 25,4mm müssen die Linien gerade, parallel und in gleichem Abstand zueinander und unter einem hohen Bildkontrast sichtbar sein.

Durch die oben beschriebenen Produktionsmethoden, die vielen Testschritte, letztlich in Autokollimation des kompletten Systems im Tubus, sollte jedes ausgelieferte EdgeHD Teleskop eine einwandfreie visuelle Abbildungsleistung erbringen. Für den fotografischen Einsatz folgt nun noch ein Abnahmetest mit einer Zertifizierung („Final Acceptance Test – FAT“).



Abb.20

Abbildung 20 (links) zeigt den Testaufbau. Das Teleskop wird mit einer Vollformat DSLR Kamera bestückt. Um Wärmequellen zu vermeiden, wird das Licht zur Erzeugung eines künstlichen Sterns über ein Glasfaserkabel auf den präzisen Parabolspiegel gelenkt und erzeugt so ein paralleles Strahlenbündel. Anders als in den vorherigen Tests wird diesmal kein monochromatisches Laserlicht, sondern weißes Mischlicht benutzt, um so einen realen Stern zu simulieren, denn der leuchtet ja nicht nur in einer

Wellenlänge. Nur mit Mischlicht können chromatische Restfehler erkannt werden.

Der Prüfer positioniert nun das Teleskop so, dass der künstliche Stern genau in der Mitte einer Vollformat-DSLR (Chipgröße 24 x 36mm, Bilddiagonale = 42mm) erscheint. Das Bild wird sorg-

fältig fokussiert und es wird eine Aufnahme erstellt. Anschließend wird der Tubus jeweils so positioniert, dass der künstliche Stern jeweils in einer der vier äußeren Ecken der Kamera erscheint. Es werden nun nacheinander vier Bilder aufgenommen, OHNE dass die Fokussierung verändert wird. Zum Abschluss des Tests wird ein sechstes Bild in Mittenzentrierung aufgenommen.

Die Testkamera wurde einmalig sorgfältig vermessen, um sicherzustellen, dass das Kameragehäuse zusammen mit dem Aufnahmechip und dem T2 Adapter auch exakt im rechten Winkel zu Fokalebene des Teleskops stehen.

Die Beurteilung der sechs Aufnahmen erfolgt sehr kritisch und unter hoher Bildschirmvergrößerung. Jede Sternabbildung der sechs Aufnahmen muss rund, bei gleichem Durchmesser und sauber fokussiert erscheinen. **KEIN** EdgeHD Tubus, der diesen Test nicht besteht, verlässt das Werk zu einem Händler oder zu einem Kunden.

Wird dieses Kriterium nicht erfüllt, wird der Tubus zurück in die Produktion verbracht, und es wird zuerst die Kollimation und die Zentrierung der Schmidtplatte überprüft.

Während der kompletten Produktion der optischen Einzelteile, der vielen Tests und des abschließenden FAT wird jedes Teil markiert und die Testergebnisse protokolliert, so dass der Produktionsprozess für jeden einzelnen EdgeHD-Tubus nachvollziehbar ist. Schickt ein Kunde ein Teleskop zur Wartung oder aufgrund anderer Fehler ein, können wir zugeordnet den kompletten Produktionsprozess zurück verfolgen.

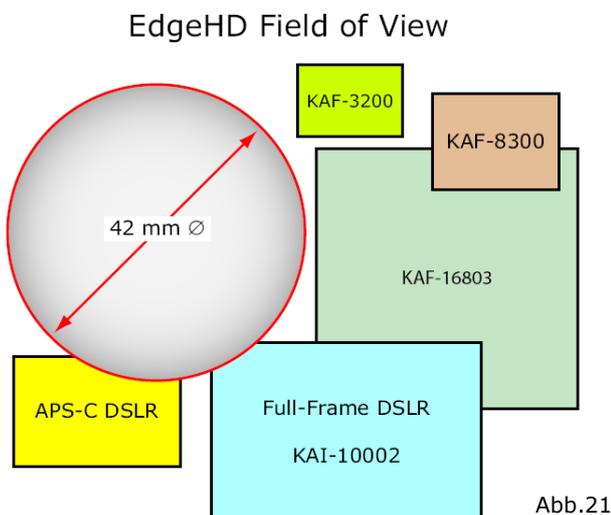
Nach Passieren des FAT-Tests werden die Zentrierschrauben der Schmidtplatte mit einem Spezialkleber gesichert, der Tubus wird einer optischen Qualitätskontrolle (Schrammen, Kratzer, Delen etc) unterzogen, gereinigt und zum Transport an Händler oder Endkunden (nur USA) verpackt.

## 07 - Zur visuellen Beobachtung mit einem EdgeHD Teleskop

Sowohl die klassischen SC- als auch die EdgeHD-Teleskopserien zeigen in Bildmitte eine beugungsbegrenzte Auflösung und eignen sich gleichermaßen für die Beobachtung mit hohen Vergrößerungen von annähernd punktförmigen Objekten wie Planeten und Doppelsternen.

Abbildung 21 (unten) zeigt das Feld der EdgeHD Teleskope von 42mm Durchmesser im maßstäblichen Vergleich zu einigen aktuellen Bildsensoren für die Astrofotografie. Die Bilddiagonale eines Vollformat Chips (z.B. KAI 10 002) beträgt 42mm.

Das klassische SC Teleskop zeigt außerhalb der optischen Achse mit zunehmendem Abstand Komma, bedingt durch das nicht ebene Bildfeld.



Bei der Beobachtung von großflächigen Objekten wie z.B. des Mondes, von DeepSky Objekten wie Sternhaufen spielt hier das EdgeHD Teleskop in einer anderen Liga, denn die Abbildung bleibt auch weit außerhalb der optischen Achse fehlerfrei, bedingt durch das plane Gesichtsfeld und des Korrektionsystems im SkyBaffle.

Moderne Weitwinkel-Okularkonstruktionen zeigen heute scheinbare Gesichtsfelder von 80 bis 100 Grad, so z.B. das 23mm Luminos Okular. Ein klassisches SC Teleskop zeigt hier außerhalb der Bildmitte zunehmend Komaeffekt. Die Sternabbildungen werden unscharf und verwaschen, dadurch wird die visuell wahrnehmbare Grenzgröße von Sternen deutlich geringer.

Anders beim EdgeHD-Teleskop. Hier bleiben die Sterne außerhalb der optischen Achse scharf fokussiert und ohne erkennbare Abbildungsfehler. Den „optischen Genuss“, z. B. die Beobachtung eines hellen offenen Sternhaufen innerhalb eines großen Gesichtsfeldes und nicht nur formatfüllend im Okular zu sehen, muss man erleben, beschreiben kann man ihn kaum.

Einem erfahrenen Beobachter wird das EdgeHD Teleskop in einer klaren Nacht mit gutem stationärem Seeing absolut runde Sternbilder mit einem Beugungsring zeigen. Intra- und Extrafokale Beugung ist identisch und Doppelsterne werden bis zur „Dawes“-Grenze getrennt. Details in den Saturnringen werden ebenso deutlich sichtbar wie zarte Schattierungen in den Wolkenstreifen auf Jupiter.

Um die an allen vier EdgeHD Teleskopen – im Vergleich zum klassischen SC Teleskop – kritischere Fokusdistanz von optischem und fotografischem Zubehör einhalten zu können, werden zu jeder Teleskopgröße entsprechende Adapter zur Befestigung von 1¼- und 2 Zoll Zubehör als Standard mitgeliefert oder sind als Zubehör separat erhältlich.

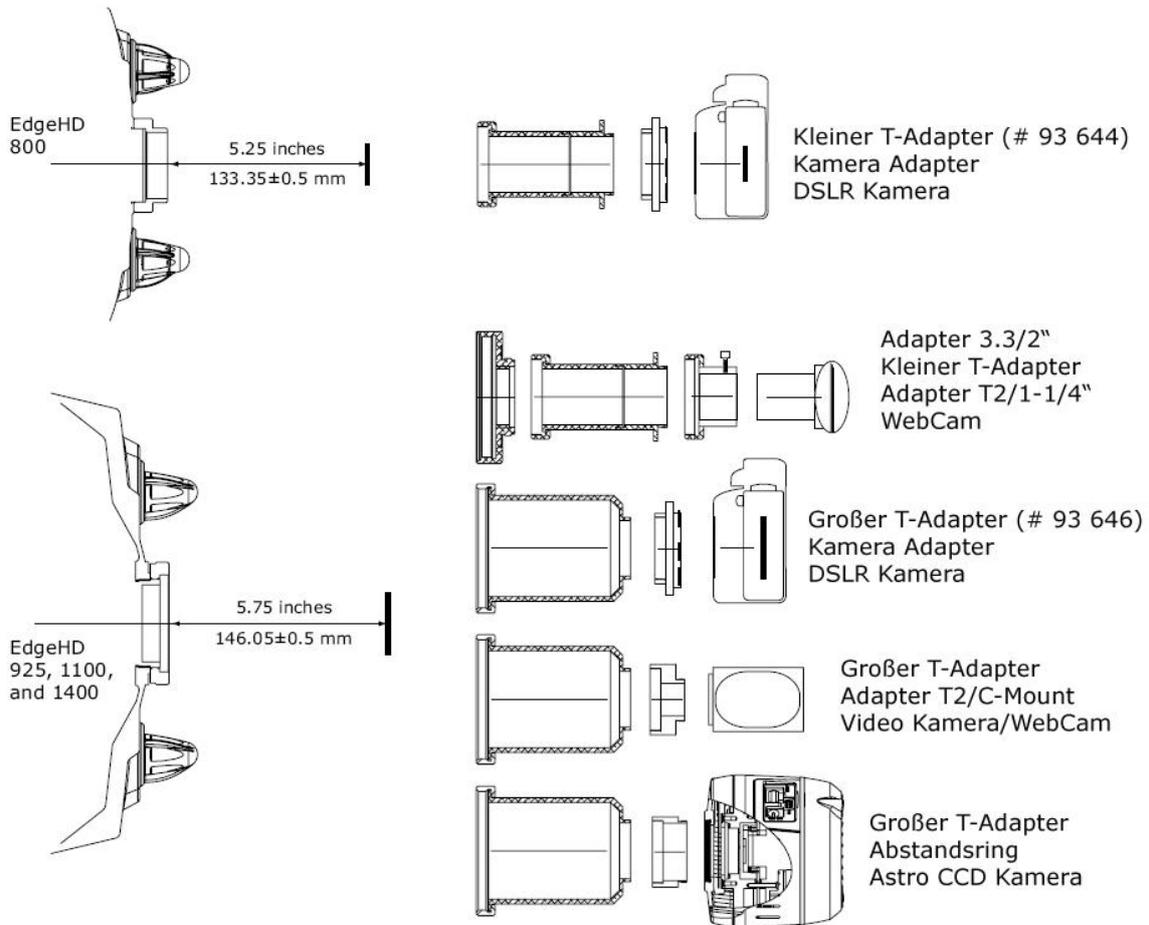
## **08 - Zur Astrofotografie mit einem EdgeHD Teleskop**

Das Edge HD System ist unter anderem auch für die perfekte Fotografie mit Vollformat-Sensoren entwickelt worden. Um die hohe Qualität der Abbildung über ein so großes Feld auch nutzen zu können, ist die Platzierung des Aufnahmechips in der optimalen berechneten Fokalebene überaus wichtig. Der Aufnahmesensor sollte, wenn möglich, innerhalb einer Toleranz von +/- 0.5 Millimeter platziert werden.

Wenn wir hier eine Toleranz von +/- 0.5mm angeben, ist dies ein reichlich theoretischer Wert, der sich auf die optischen Berechnungen bezieht. Dieser Wert bezieht sich auf äußerst konstanten Seeingbedingungen (beugungsbegrenzt), wie sie der normale Amateurastronom ganz selten in seiner Gartensternwarte oder seinem Balkon über ein längeres Zeitintervall vorfindet.

Als Referenzfläche für den exakten Abstand dient hier die glatte Abschlussfläche der Aufnahmegewinde für das Zubehör der Tubusrückwand, siehe hierzu auch die Abbildung 22 (dort sind die amerikanischen Bestellnummern von Celestron USA angegeben). Der Abstand für das EdgeHD 8" Teleskop liegt bei 133,35mm, für die 9.25,- 11- und 14 Zoll Tuben bei exakt 146,05 mm. Der kleine T-Adapter für das EdgeHD 800 Teleskop hat eine Länge von 78,35mm und die Artikelnummer #820759 (US-BNr. 93644). Der große T-Adapter für die größeren Modelle der EdgeHD Teleskope hat eine Länge von 91,05mm und die Artikelnummer #820758 (US-BNr. 93646). Übergangsadapter von 3,3" auf 2" gibt es bei Baader Planetarium, ebenso viele weitere Übergangsadapter in den Zubehörsektionen 08 bis 10.

T-Ringe (M42x0,75mm Gewinde) für viele verschiedene Kamerahersteller mit den entsprechenden Bajonettformen sind lieferbar. Das Standardmaß für den Abstand zwischen Vorderfläche des T-Ringes und des Bildsensors einer DSLR Kamera liegt bei 55mm.



Ein Sonderfall ist der Anschluss einer Astro CCD Kamera. Hier müssen Sie den Abstand der Chip-Ebene zum Gehäuseabschluss kennen und dann einen entsprechenden Zwischenring einsetzen. Ein Beispiel: Beträgt die Distanz zwischen T2 Innengewinde der Kamera und Sensor 40mm, benötigen Sie einen T2-Verlängerungsring (Innen auf Außengewinde) von 20mm Länge. In der Zubehör Sektion 08 (T2 Zubehör) bei Baader finden Sie solche Zwischenringe in den Längen 7,5mm, 15mm und 40mm und variable Ringe mit 20-29mm und 29-46mm Länge.

Die Abbildung 23 (rechts) zeigt noch einmal den maßstäblichen Größenvergleich zwischen einem Vollformat- und dem APS-C Chip einer digitalen Spiegelreflexkamera. Der in vielen astronomischen CCD Kameras eingebauten Kodak KAF 8300 ist noch etwas kleiner als der APS-C Chip.

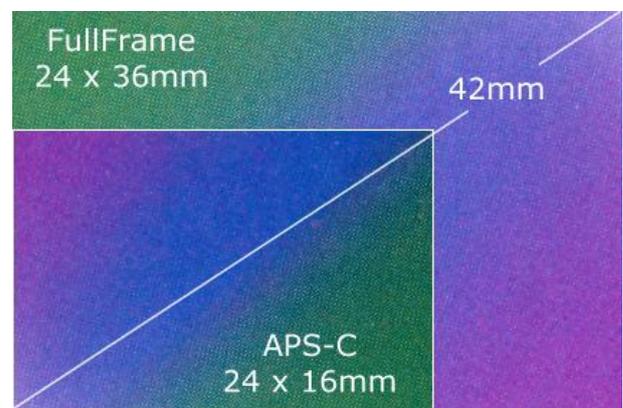


Abb.23

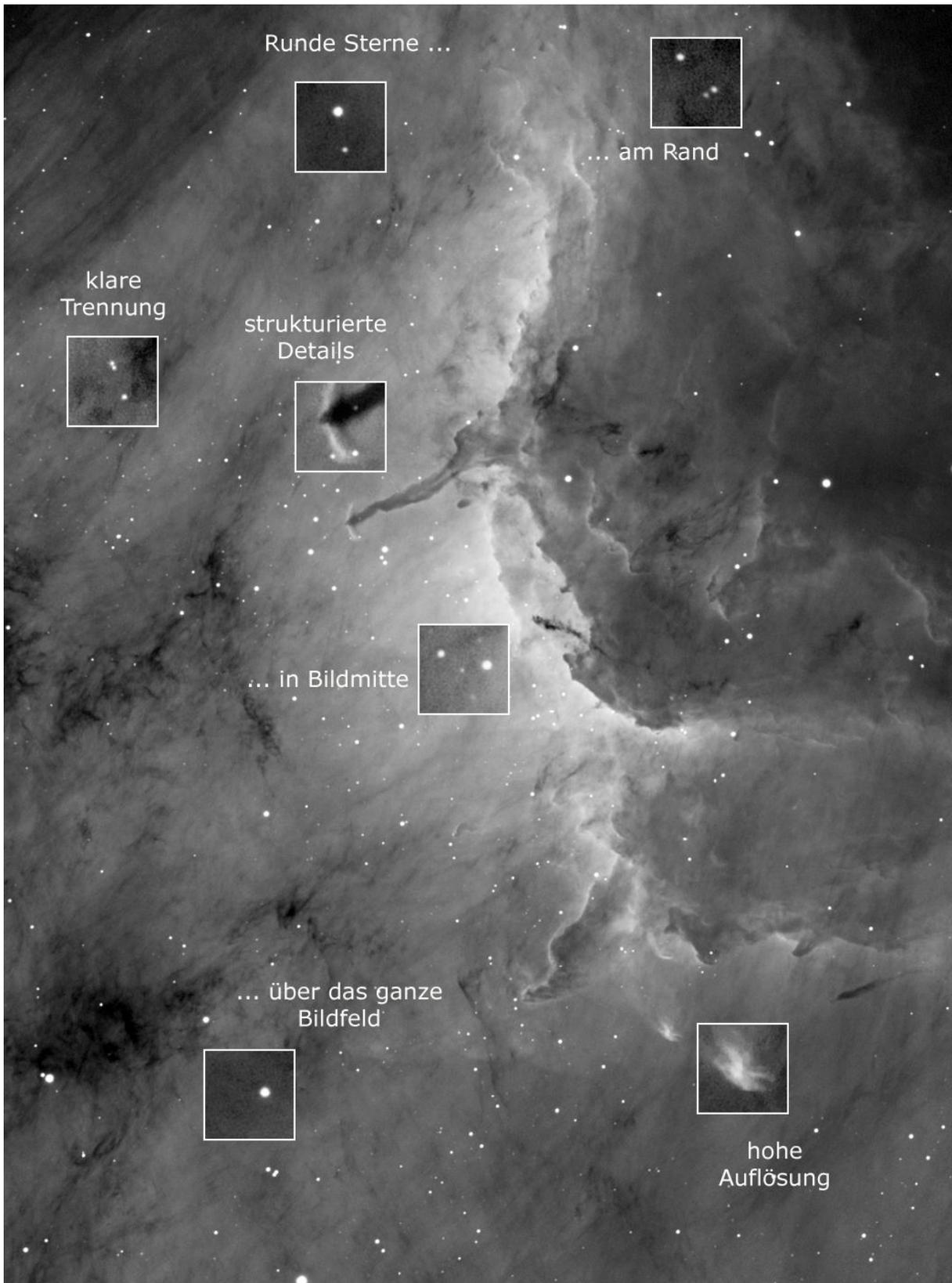


Abbildung 24: Details im Pelikannebel. Celestron EdgeHD 1400-f/10,8, Feldgröße: 27,3 x 21,3 Bogenminuten (21,5 x 30mm), Abbildungsmaßstab: 0,484 Bogensekunden/Pixel. Aufnahmekamera: Apogee U16m. Das Bild ist ein Ausschnitt aus dem Originalbild von 36,8 x 36,8mm. Copyright: Andre Paquette

**Tabelle 01** zeigt die kompletten optisch/geometrischen Daten für die 4 EdgeHD Teleskope.

Teleskop	Öffnung Öffnungsver. Brennweite	Durchmesser FS + Ob- struktion	Fokusslage	Bildfeld	Beugungs- scheibe	Abbildungs- maßstab
EdgeHD 800	203mm f/10,5 2.125mm	68,6mm 34%	133,35mm 2"	42mm 68,0'	1,36" 14,0mü 0,68"	0,62"/pxl
EdgeHD 925	235mm f/9,9 2.321mm	85,1mm 36%	146,05mm 3,3"	42mm 62,2'	1,18" 13,2mü 0,59"	0,57"/pxl
EdgeHD 1100	280mm f/10 2.788mm	92,3mm 33%	146,05mm 3,3"	42mm 51,8'	0,99" 13,3mü 0,5"	0,47"/pxl
EdgeHD 1400	355.6mm f/10,8 3.857mm	114,3mm 32%	146,05mm 3,3"	42mm 37,4'	0,78" 14,4mü 0,39"	0,34"/pxl

In der **zweiten Spalte** ist die Öffnung in mm, das Öffnungsverhältnis (Verhältnis Öffnung zur Brennweite) und die Brennweite in mm angegeben.

In der **dritten Spalte** der Durchmesser des Fangspiegels (inkl. Fassung) in mm und die flächenmäßige Obstruktion (Abschattung HS durch FS) in % gegeben.

In der **vierten Spalte** ist die Fokusslage und der Durchmesser des Tubusanschlussgewindes angegeben.

Die **fünfte Spalte** gibt das Gesichtsfeld in mm und darunter in Bogenminuten an.

Die **sechste Spalte** gibt den Durchmesser des Beugungsscheibchens in Bogensekunden, den Durchmesser in mü und das Trennvermögen von Doppelsternen nach Rayleigh (siehe Glossar) in Bogensekunden an.

Die **siebte Spalte** letztlich gibt den Abbildungsmaßstab in Bogensekunden pro Pixel an.

### Wenn wir diese Publikation mit dem Titel

Ein höchst anpassungsfähiges optisches System  
für Astrophotographie und visuelle Beobachtung...  
... zu einem bezahlbaren Preis.

Mit planem Gesichtsfeld und komafreier Abbildung

bezeichnet haben, soll am Ende noch auf die Möglichkeit der Brennweitenvariation und somit des Öffnungsverhältnisses hingewiesen werden. In der Tabelle 01 oben werden in der **ersten Spalte** die optischen Daten des jeweiligen Teleskops genannt: Teleskopöffnung, Öffnungsverhältnis und Brennweite.

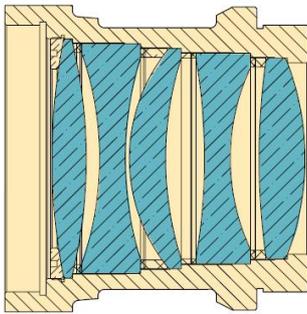
### 09 - Brennweiten reduzierende Systeme und das HyperStar System

Natürlich können Sie wie bei jedem Teleskop die Brennweite zum Beispiel für hoch auflösende Mond- oder Planetenbilder mit einer Barlowlinse verdoppeln oder verdreifachen. Hierzu bietet CELESTRON die Barlowlinsen 2x X-CEL (#820492) oder 3x X-CEL (#820494) an.

Die Deep-Sky-Fotografie stellt dagegen andere Ansprüche.

Je kürzer die Brennweite – bei gleich bleibender Teleskopöffnung – desto kürzer werden die Belichtungszeiten für flächige Beobachtungsobjekte. Wir haben deshalb vorerst für die 11- und 14 Zoll Teleskope eine hochwertige, 5-linsige Optik entwickelt, die die jeweilige Brennweite um den Faktor 0.7 reduziert. Eine vierlinsige Optik für das 8" EdgeHD ist ebenfalls verfügbar. Auf Grund der speziellen Konstruktion der 9.25er Teleskope ist es zur Zeit noch offen, ob es dafür eine Zusatzoptik zur Brennweitenreduzierung geben wird

Durch die Reduzierung der Primärbrennweite um den Faktor 0,7 wächst die abgebildete scheinbare Himmelsfläche um den Faktor 1,4. Dabei reduziert sich die Belichtungszeit im Vergleich zur Fotografie im Primärfokus ohne Reducer um die Hälfte, bei identischem Signal/Rauschverhältnis (gleiches Aufnahmeobjekt vorausgesetzt).

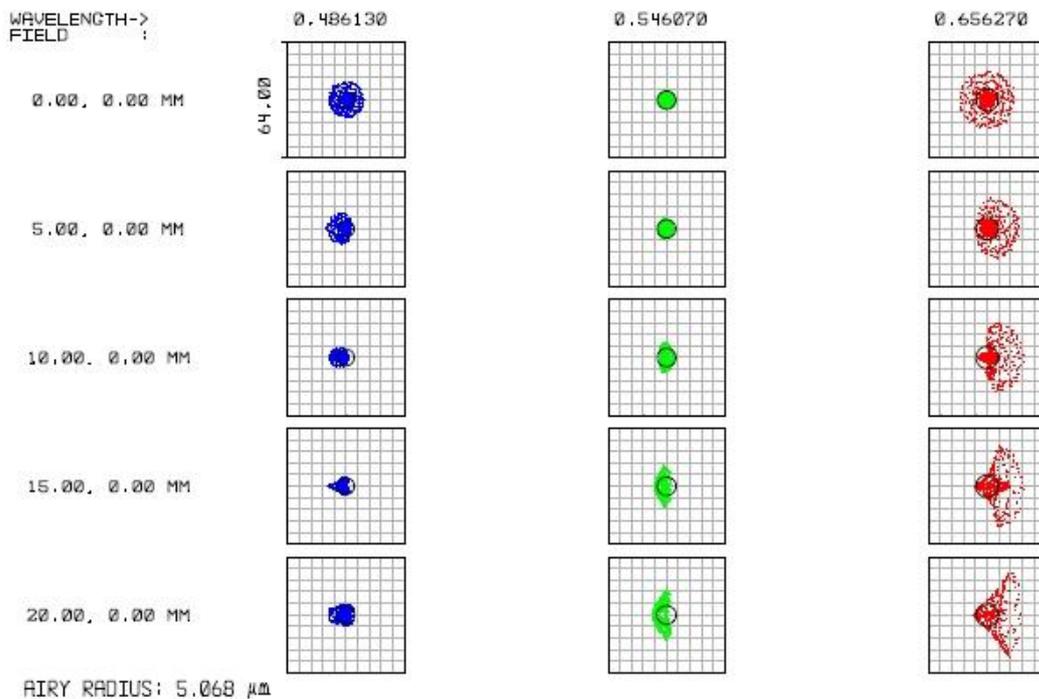


EdgeHD 0.7fach Fokal Reducer Abb.25

Die Reducer für 11 und 14 Zoll haben eine freie Öffnung von 60 Millimetern, selbst bei einer Vollformat-DSLR-Kamera ergibt sich keinerlei (zusätzliche) Vignettierung. Alle 10 Linsenflächen sind multivergütet und entspiegelt, um eine maximale Lichttransmission zu garantieren und gleichzeitig die Entstehung zu Reflexionen innerhalb der Linsen zu verhindern.

Abbildung 26 zeigt Spotdiagramme für die beiden Reducer des 11- und des 14 Zoll EdgeHD Teleskops.

Die optische Konstruktion wurde so angelegt, dass der Reducer zusammen mit der Korrekturoptik im Baffle auf der optischen Achse beugungsbegrenzt arbeitet. Die Fokalebene wurde so gelegt, dass der Reducer auf das Abschlussgewinde des Tubus aufgeschraubt wird und die Fokalebene unverändert 146,05mm hinter dem Ende des Reducers liegt, so dass keine zusätzlichen Zubehörteile benötigt werden. Siehe die Abbildung auf der nächsten Seite.



EdgeHD 11- und 14" mit 0.7fach Reducer

Abb.26

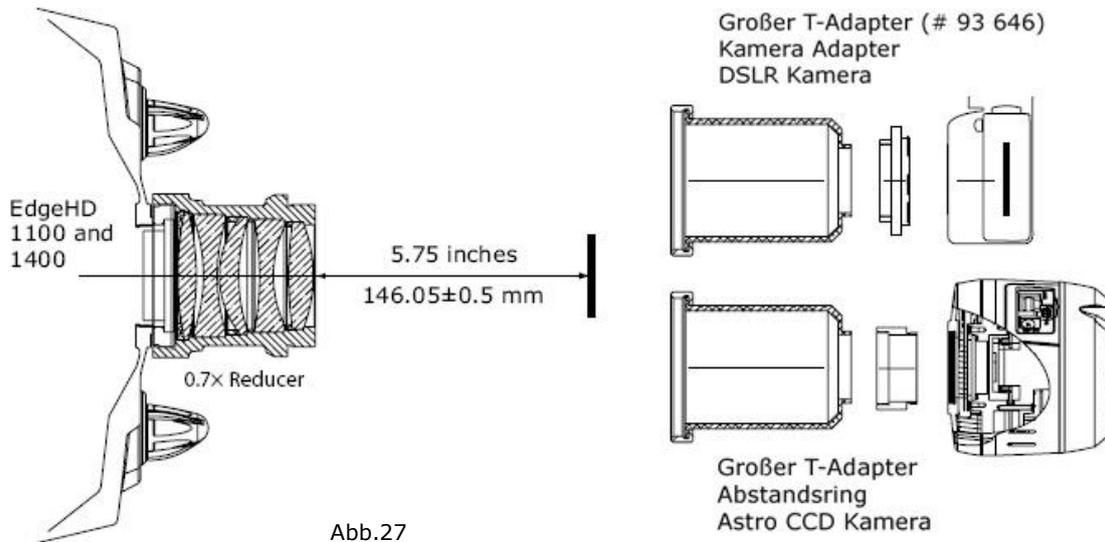


Abb.27

Eine Reduzierung der Brennweite um den Faktor 0.7 und die Verkürzung der Belichtungszeit um die Hälfte ist Ihnen zu wenig?

Dann könnte das HyperStar System der Firma Starizona für Sie interessant sein. Die EdgeHD Tuben sind für den Einsatz der HyperStar Optik vorbereitet.

Der komplette Fangspiegel inklusive Halterung und Fassung, kann innerhalb weniger Sekunden aus der Schmidtplatte des EdgeHD Tubus ausgebaut werden. Ebenso schnell ist auch das HyperStar System eingebaut.



Abb.28

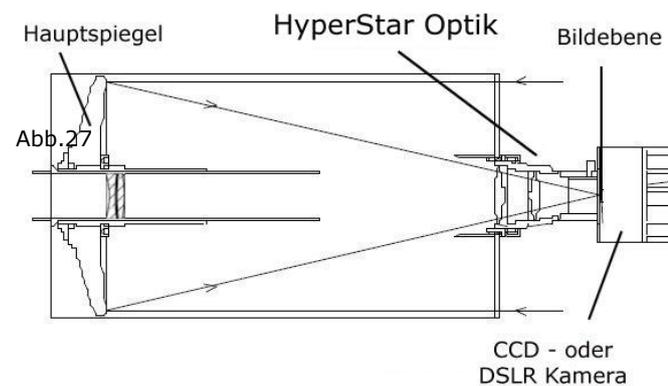


Abb.29

### Das HyperStar System für die Edge HD Teleskope

Da der Fangspiegel entfernt ist, sitzt die Aufnahmekamera jetzt direkt hinter dem HyperStar Linsensystem und nutzt so die kurze primäre Brennweite des Hauptspiegels der EdgeHD Teleskope, die z.B. beim 11 Zoll Teleskop rund 550mm beträgt. Das abgebildete scheinbare Himmelfeld ist nun viele Grad groß, das Öffnungsverhältnis liegt bei f/2 und die Belichtungszeiten bei urbanen Beobachtungsstandorten reduzieren sich auf 30- bis 60 Sekunden.

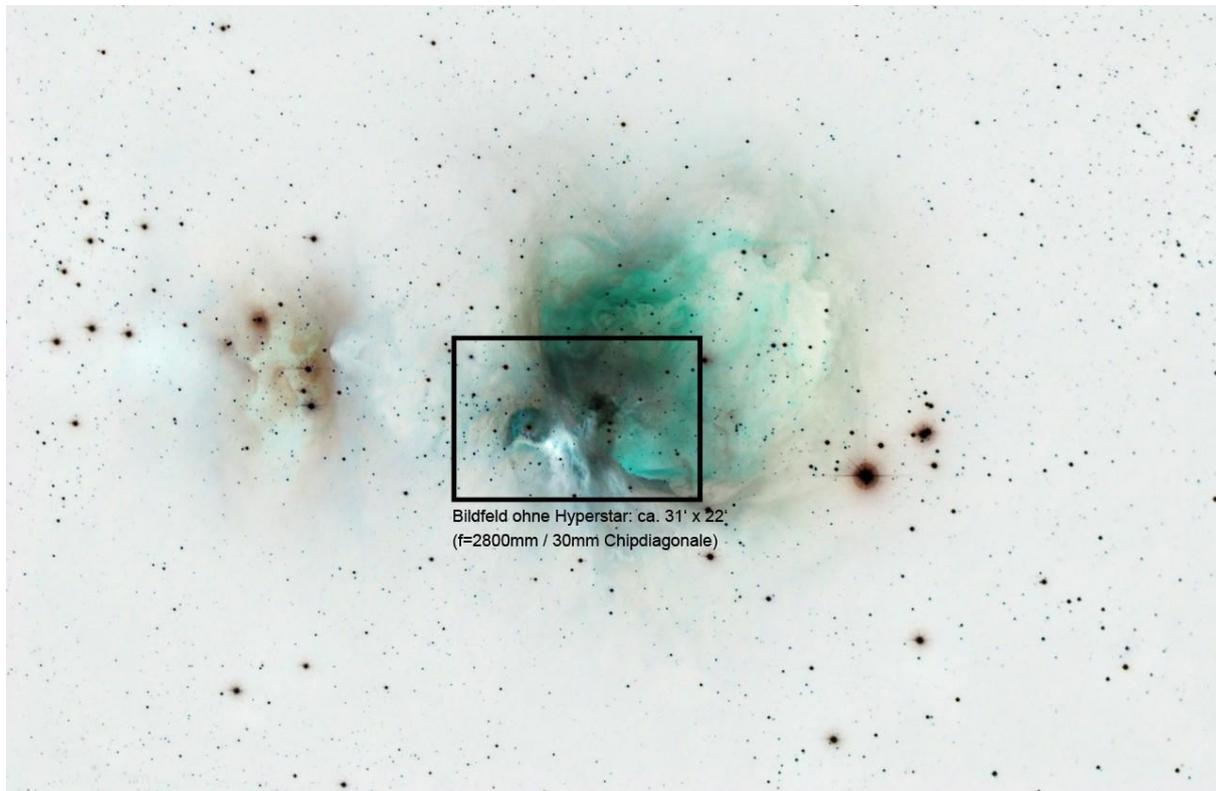
Eine visuelle Beobachtung ist mit diesem System **NICHT** möglich, da sich der Beobachter direkt vor der Lichteintrittsöffnung befinden würde.

Aufgrund der kurzen Brennweite und den daraus resultierenden kurzen Belichtungszeiten werden Anforderungen an stabile Montierungen und komplexe Guiding-Systeme auf sehr stark reduziert. Das HyperStar-System korrigiert alle optischen Abbildungsfehler, die aus dem sphärischen Hauptspiegel resultieren. Die Sternabbildungen sind scharf und rund bis in die Ecken des Bildfeldes.

Um zu verhindern, dass bei einem Wechsel zwischen Fangspiegel und HyperStar oder umgekehrt die Justage verloren geht, hat die Fassung in der Schmidtplatte eine Nut und Fangspiegelfassung und HyperStar eine Nase. So ist garantiert, dass beide optische Teile immer wieder unter dem gleichen Rotationswinkel eingesetzt werden.

### Die Vorteile eines EdgeHD Tubus mit HyperStar System in Stichworten:

- durch die Reduktion des Öffnungsverhältnis von  $f/10$  auf  $f/2$  reduzieren sich die Belichtungszeiten um den Faktor 25 (für die gleiche Durchzeichnung eines astronomischen Beobachtungsobjektes),
- wie folgende Abbildung zeigt, vergrößert sich das Gesichtsfeld enorm. Im Prinzip arbeitet man ja mit einem länger brennweitigen Teleobjektiv, allerdings bei Öffnungen von 200- bis 350mm,



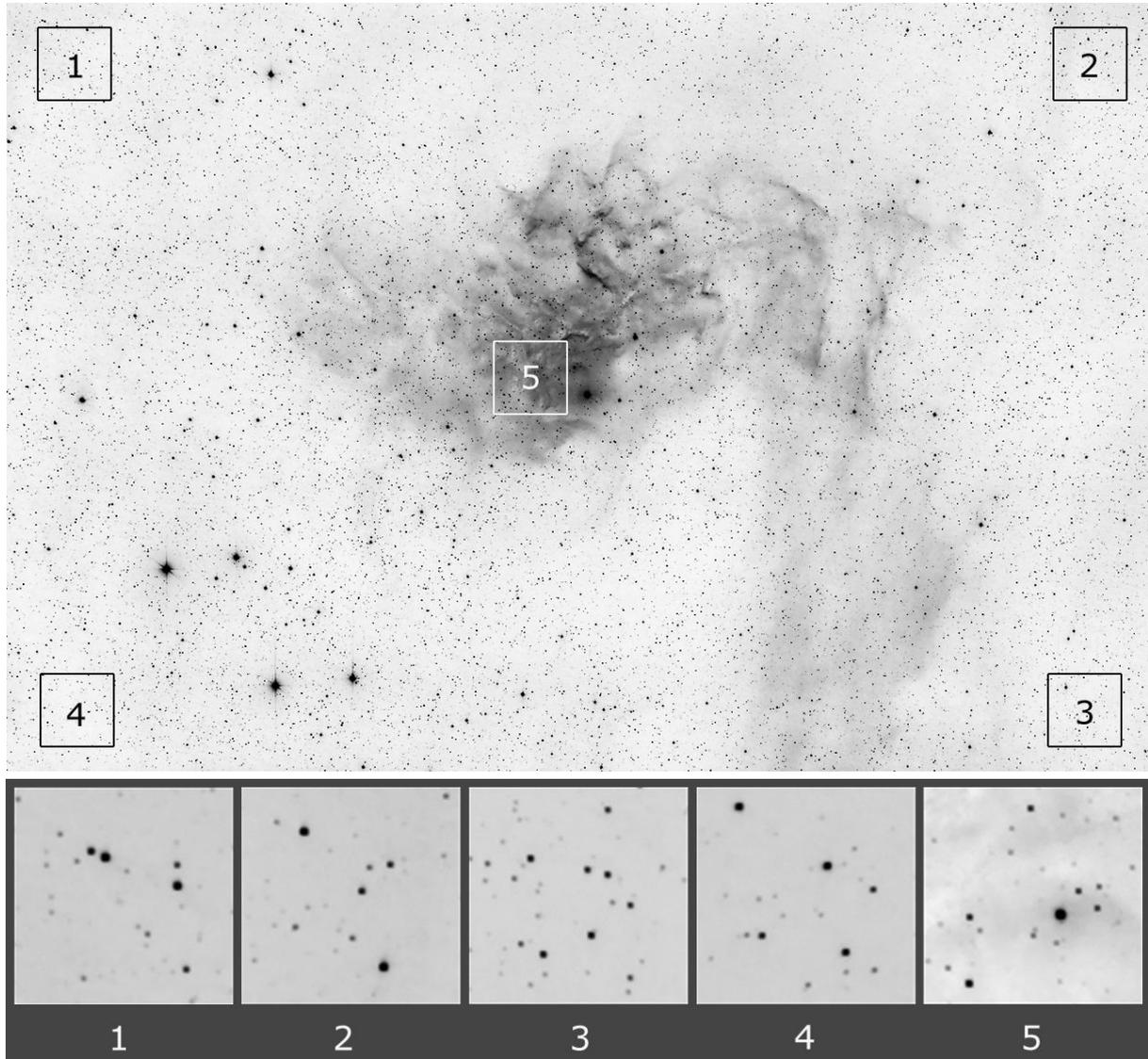
Bildfeld ohne Hyperstar: ca. 31' x 22'  
(f=2800mm / 30mm Chipdiagonale)

Abb. 30: M42 und M43 aufgenommen mit einem Edge HD 1100 und ALCCD 6c Kamera (ungefähr APS-C Chip Format) 33 x 120 Sekunden – OHNE GUIDING – belichtet. Das Bild zeigt die dramatische Vergrößerung des Aufnahmegebietes. Der schwarze Rahmen in Bildmitte zeigt das Feld ohne HyperStar System. Copyright R. Geissinger.

- durch die massive Verkürzung der Brennweite (und die Reduzierung der Belichtungszeiten durch das schnelle Öffnungsverhältnis) müssen an die mechanische Qualität der tragenden Montierung nicht mehr so hohe Ansprüche gestellt werden. Bei helleren Aufnahmeobjekten können die Belichtungszeiten soweit reduziert werden, dass auf Deklinationskorrekturen komplett verzichtet werden. Es können mehrere kurz belichtete Bilder einfach mit einer entsprechenden Software aufeinander gerechnet werden,
- auf Grund der hohen Bildhelligkeit durch den  $f/2$  Strahlengang ist das System optimal für Aufnahmen schwacher Nebelgebiete mit Schmalbandfiltern und empfindlichen CCD Kameras,
- **und last but not least:** Sie besitzen zwei Teleskopsysteme in nur einem Tubus. Mit der vollen Brennweite können Sie visuell Planeten, Mond, Doppelsterne etc. beobachten oder

hoch aufgelöste Webcambilder von Mond und Planeten aufnehmen; die HyperStar-Variante ist optimal für Gasnebel, Galaxien und Sternhaufen.

Abbildung 31: IC 405, aufgenommen mit einem Celestron EdgeHD 1100 auf CGEM-Montierung und Starizona HyperStar System. Baader Astromodifizierte Canon EOS 1100D (APS-C Chip). 169



Einzelbilder je 60 Sekunden. Bildverarbeitung: Fitswork, Regim, Photoshop. Aufnahmeort: Südlicher Strand von Hannover. Copyright by F. Hofmann

Die Abbildung oben zeigt das unbeschnittene Bild, die Reihe zeigt Ausschnitte mit auf 200% skalierte Ausschnitte die im Bild oben mit 1 bis 5 markiert sind.

## Anhang A01 - Das technische Profil der EdgeHD Teleskopserie

Die fotografische Abbildungsqualität astronomischer Teleskope ist bestimmt durch eine Anzahl von Faktoren, die ein Beobachter kennen sollte, wenn er die Qualität seiner Aufnahmen abschätzen will. Die wichtigsten sind:

- die Abbildungsqualität des Teleskops,
- das Beugungsmuster der Teleskopabbildung,
- das Verhältnis von Pixelgröße des Sensors zum Abbildungsmaßstab (der Aufnahmebrennweite),
- die Seeingbedingungen während der Belichtung und
- die Genauigkeit der Nachführung während der Belichtung

Um den Astrofotografen bei der Qualitätsanalyse seiner Bilder etwas zu unterstützen, haben wir für die vier EdgeHD-Teleskope eine Spot Matrix gerechnet, die in Abbildung A1 gezeigt ist. Die grauen Kästchen haben eine Seitenlänge von 64mü. Die Kästchen der Spotdiagramme auf den nächsten Seiten haben ebenfalls 64mü Kantenlänge und sind noch unterteilt in jeweils 10 x 10 Kästchen zu je 6,4mü Seitenlänge.

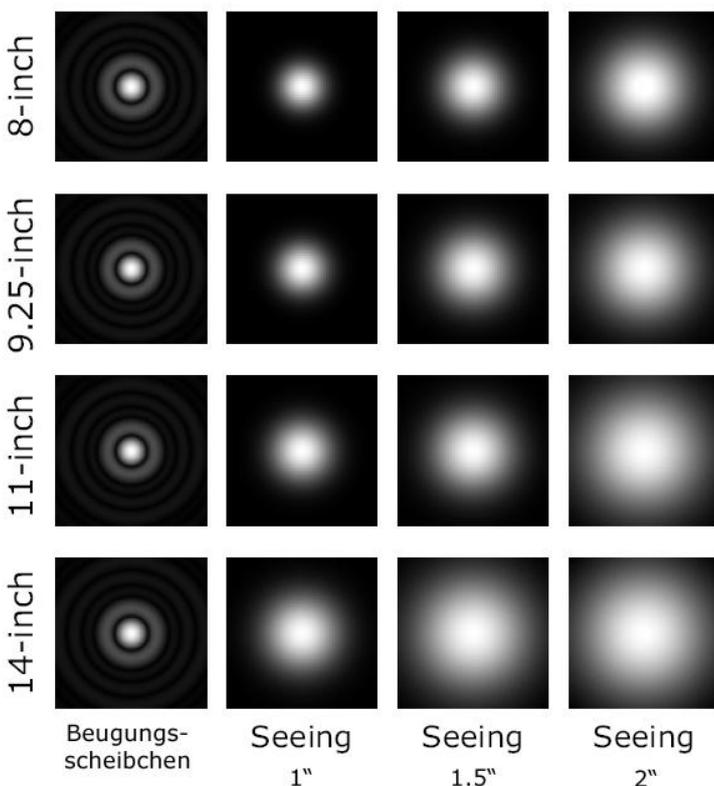


Abb. A1

Abbildung A-1 (links) zeigt maßstäblich die Beugungsscheibchen (linke Spalte) und durch Seeing verwischte Beugungsscheibchen für exzellentes Seeing (1"), für gutes Seeing (1.5") und für mittelmäßiges Seeing (2", rechts außen). Um Beugungsscheibchen und den ersten Beugungsring zu sehen, braucht es Seeingbedingungen deutlich besser als 1".

Die Bezeichnung von mittel, gut und exzellent ist natürlich willkürlich. Für einen Beobachter, der an seinem Standort ein mittleres Seeing von 3 bis 4" hat, für den ist dann 2" schon exzellent.

In den Spotdiagrammen sind die 64mü Quadrate noch jeweils in 10 x 10 kleine Quadrate unterteilt, so entspricht die Seitelänge jedes Kästchens genau 6,4 mü. Das ist die typische Pixelgröße einer modernen CCD- oder DSLR Kamera. Der schwarze Kreis entspricht dem Durchmesser des Beugungsscheibchens inklusive des schwarzen Zwischenraumes bis zum Rand des ersten hellen Beugungsringes.

Es wird sofort klar, dass ungefähr 2 Pixel des Aufnahmesensors den Durchmesser des Beugungsscheibchens abdecken. Das bedeutet, dass unter idealen Bedingungen, bei einer Pixelgröße von grob 6,5mü ein Hauptteil des Lichtes auf dieses eine Pixel konzentriert wird. Bezug nehmend auf die Abbildung A1 zeigt die linke Spalte die Größe des Beugungsscheibchens bei einer zentralen Obstruktion von 34% (Abdeckung des Hauptspiegels durch den Fangspiegel). Weil aber das Licht in der inneren Beugungsscheibe auf das Zentrum konzentriert ist, muss man zur Aufnahme von feinsten Details in der Mond- und Planetenfotografie die Brennweite durch den Einsatz einer 2- oder 3-fach Barlowlinse verlängern, um das Beugungsscheibchen zu vergrößern.

Unglücklicherweise sind ideale Seeingkonditionen – zumindest an Amateurstandorten – selten konstant und gut, sondern eher mittelmäßig und stark wechselnd. Während der Belichtung einer

Aufnahme werden die Beugungsscheiben durch atmosphärische Turbulenzen nicht nur vergrößert (blurring), sondern auch die Lage der zentralen Beugungsscheibe ändert sich – in Abhängigkeit der Seeingkondition – ständig. Die Abbildung des Sternbildes wird also aufgeblasen und verwischt. Abbildung A1 zeigt dies für die 4 verschiedenen EdgeHD Teleskope in Abhängigkeit von den Seeingkonditionen.

Es ist wichtig zu wissen, dass eine Erhöhung der Aufnahmebrennweite proportional auch den Durchmesser der verwischten Sternscheibchen vergrößert. Mit einem Teleskop kleiner Öffnung und kurzer Brennweite spielen die Seeingkonditionen eine eher untergeordnete Rolle. Öffnungen und Brennweiten der vier EdgeHD Teleskope erfordern schon relativ gute und stabile Seeingbedingungen, um ihr volles Abbildungspotential zu nutzen.

Deshalb sollten vor einer Kaufentscheidung für eine bestimmte Teleskopgröße die mittleren Seeingbedingungen am Hauptbeobachtungsort bekannt sein. Diese kann man z.B. durch die Beobachtung von Doppelsternen über einen bestimmten Zeitraum bereits einigermaßen sicher bestimmen. So macht es wenig Sinn bei mittleren Seeingbedingungen um die 3 Bogensekunden ein Gerät mit 14" Öffnung zu kaufen. Dies kann dann vielleicht 2 oder 3 Nächte im Jahr eingesetzt werden, während ein Gerät mit 9,25- oder 11" in viel mehr klaren Nächten ausgereizt werden kann. Das gilt natürlich nur für das Auflösungsvermögen - die Nebelbeobachtung profitieren auch bei schlechtem Seeing von der größeren Öffnung, und wenn die Luft einmal „steht“, wird auch größeres Teleskop mehr zeigen als ein kleineres, das am Limit seiner Leistungsfähigkeit ist.

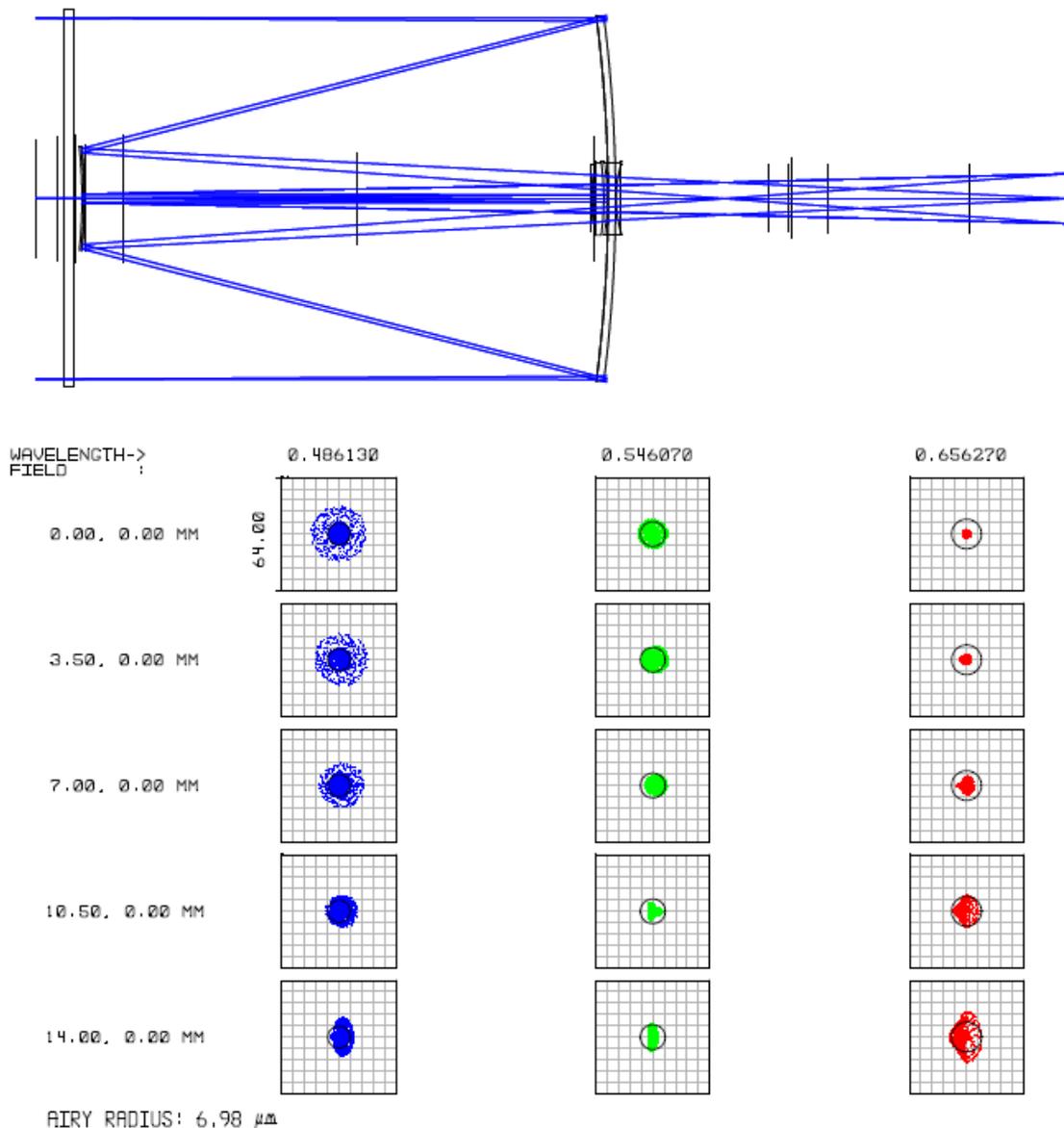
Auf den nächsten vier Seiten zeigen wir nun die Spotdiagramme für die vier EdgeHD Teleskope. Die Diagramme wurden für die drei Prüfwellenlängen blau (486nm), grün (546nm) und rot (656,3nm) gerechnet. Die Darstellung zeigen die Bilder auf der optischen Achse und jeweils im Abstand von 3,5, 7, 10,5 und 14mm. Während für den rein visuellen Beobachter hauptsächlich der grüne Anteil des Lichtes maßgeblich ist, sollte der fotografische Beobachter seine Aufmerksamkeit auch auf rotes und blaues Licht richten. Das menschliche Auge ist im grünen Spektralbereich sehr empfindlich, die Empfindlichkeit bei 486 nm (blau) und 656,3 nm ist deutlich geringer.

### EdgeHD 800

Auf der optischen Achse bildet das 8" Teleskop im grünen und im roten Licht beugungsbegrenzt ab, da alle Lichtstrahlen innerhalb der Beugungsscheibe gebündelt werden. Da auch ein Großteil des blauen Lichtes innerhalb der Beugungsscheibe konzentriert wird, gilt die Abbildung auch im blauen Spektralbereich als beugungsbegrenzt.

Außerhalb bleibt das 8" Teleskop beugungsbegrenzt über ein scheinbares Gesichtsfeld größer als der Vollmond. Das 8" EdgeHD ist ausgelegt für die perfekte Bildaufnahme mit APS-C Kameras (Chipgröße ca. 22 x 15mm), obwohl es natürlich auch 42mm Bildfeld besitzt. Die Vignettierung in den äußersten Ecken des APS-C Bildfeldes beträgt ca. 16%. Dies ist mit Ausnahme der Fotografie sehr lichtschwacher Objekte praktisch nicht wahrnehmbar. Für die Fotografie großflächiger lichtschwacher Nebelgebiete empfiehlt sich die Anfertigung eines Flatfield Bildes.

### Celestron EdgeHD 800



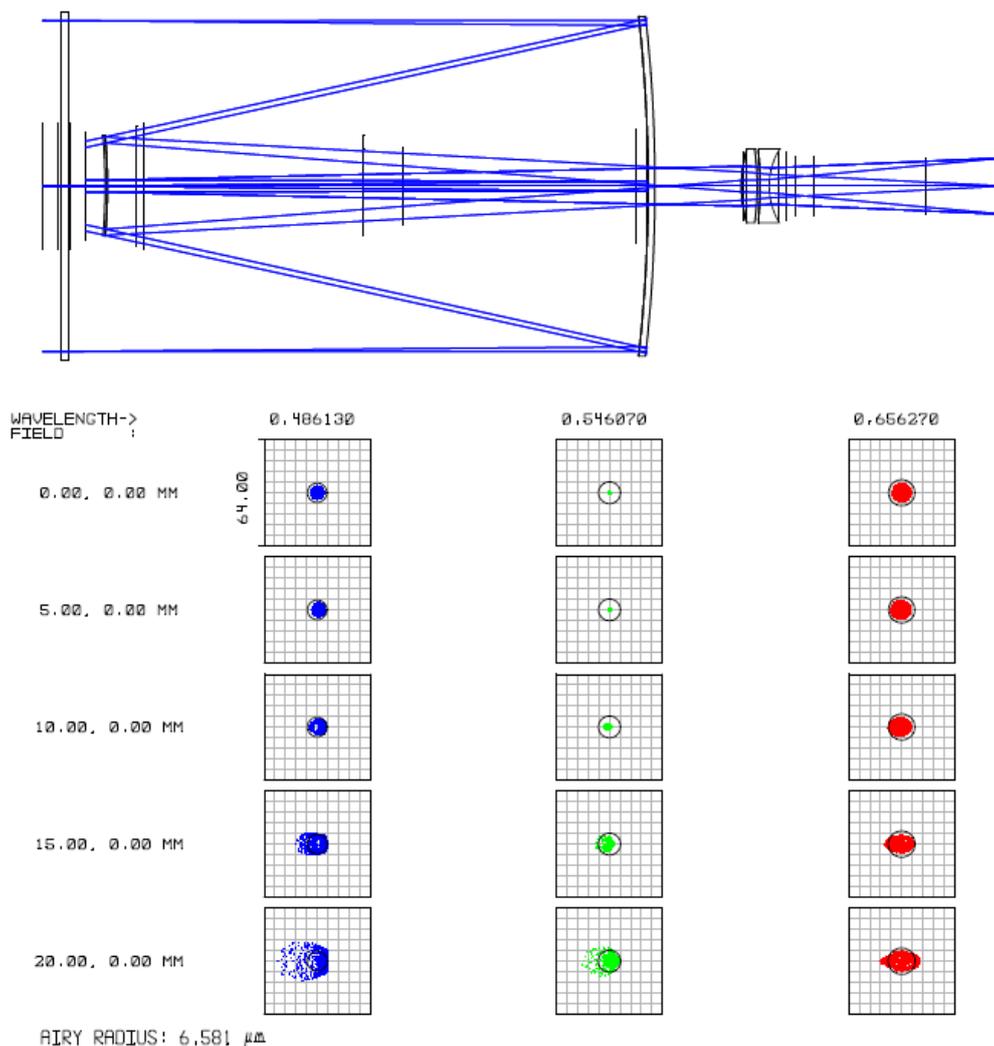
### EdgeHD 925

Die Spotdiagramme auf der optischen Achse zeigen, dass das 9,25" Teleskop in allen drei Wellenlängen beugungsbegrenzt abbildet. Selbst bis zu einem Abstand von 15mm neben der optischen Achse arbeitet das Teleskop beugungsbegrenzt, obwohl etwas blaues Licht außerhalb des Beugungsscheibchens liegt.

In Nächten mit durchschnittlichem Seeing werden Sterne mit einem FWHM Wert (siehe Glossar) von ca. 23mü Durchmesser abgebildet. Das entspricht etwa den Spotgrößen am äußersten Rand des 42mm Gesichtsfeldes. Die Vignettierung ist vernachlässigbar. Die inneren 12mm sind komplett unvignettiert, während sie am äußeren Bildfeldrand bei ca. 10% liegt. Flatfieldbilder müssen nur für extreme Aufnahmeobjekte angefertigt werden.

Das EdgeHD 925 ist eine exzellente Wahl für Beobachter mit „schmalen Geldbeutel“. Es liefert über das komplette Feld in allen drei Wellenlängen eine fast beugungsbegrenzte Abbildung bis in die äußersten Ecken eines Vollformatchips. Ebenso ist es großartig für die visuelle Beobachtung und die Aufnahme von hochaufgelösten Planetenbildern mittels Webcam Technik in Farbe geeignet. Selbst bei der Aufnahme mit SW WebCams und RGB Filtertechnik muss das Teleskop in den drei Wellenlängen nicht nachfokussiert werden.

### Celestron EdgeHD 925

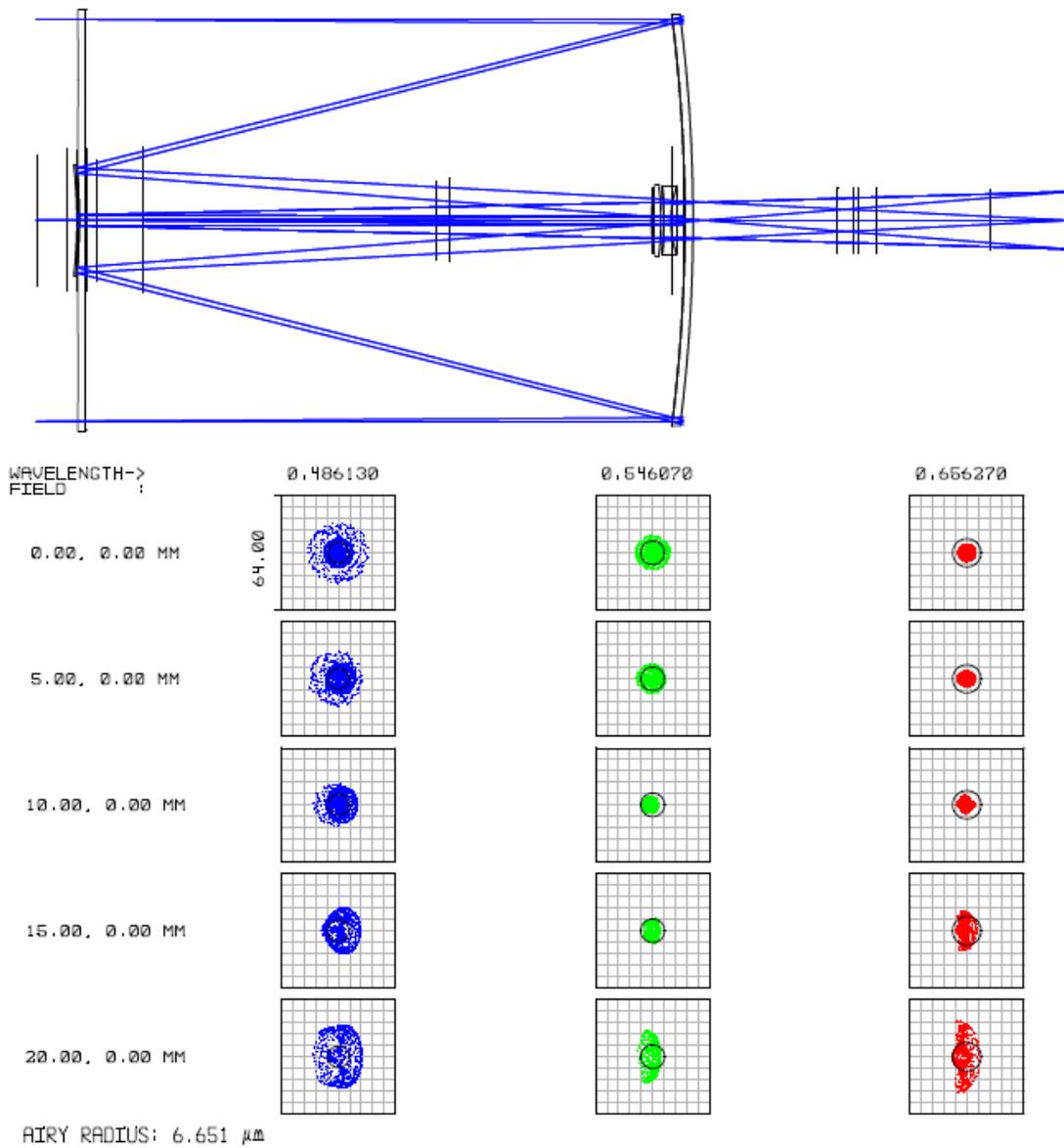


### EdgeHD 1100

Das EdgeHD 1100 ist für die Abbildung im grünen und roten Licht optimiert worden. In diesen Spektralbereichen arbeitet es in einem Durchmesser von ca. 28mm beugungsbegrenzt. Die inneren 16mm Durchmesser des Bildfeldes sind vignettierungsfrei, danach steigt die Vignettierung bis in die Ecken des Vollformats auf ca. 17%. Für die Aufnahme von Bildern mit APS-C Chips sind Flatfieldbilder nicht notwendig.

In Nächten mit Seeingkonditionen von ca. 1,5" liegt der durchschnittliche Durchmesser der Sterne auf der optischen Achse bei 18mü. In solchen Nächten liefert das EdgeHD 11 eine annähernd beugungsbegrenzte Abbildung über einen Durchmesser von 30mm und darüber hinaus bis in die Ecken des Vollformatchips eine saubere Abbildung mit runden Sternabbildungen.

### Celestron EdgeHD 1100

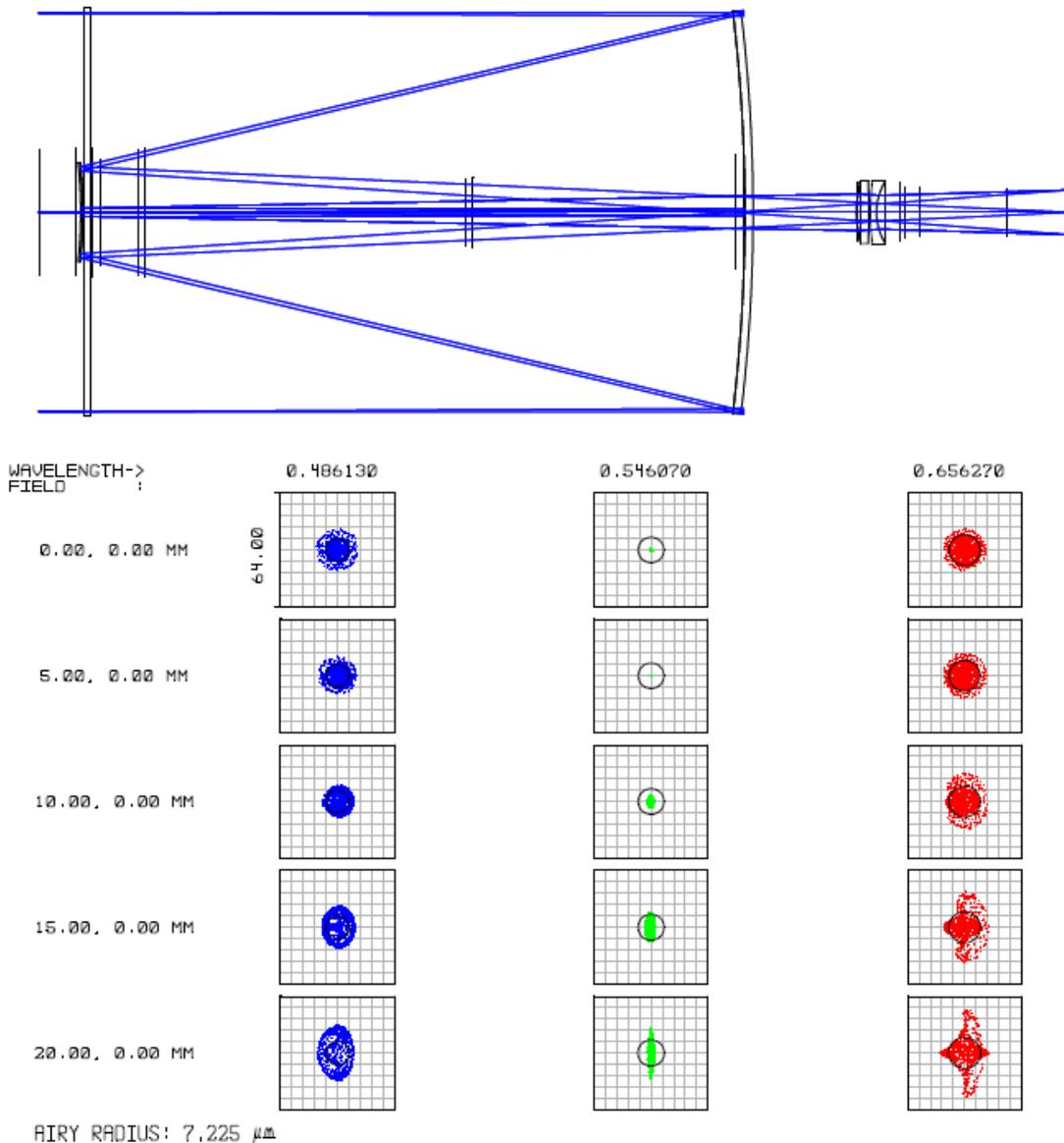


**EdgeHD 1400**

Im grünen Licht ist das 14" Teleskop beugungsbegrenzt über einen Gesichtsfelddurchmesser von 28mm. Die Vignettierungsverhältnisse entsprechen dem EdgeHD 1100. Für blaues und rotes Licht ist die Sphärochromasie von der optischen Achse bis zum Abstand von 20mm sehr gut ausbalanciert. Die Spots sind um Klassen besser als die eines apochromatischen Refraktors gleicher Öffnung und Öffnungsverhältnisses.

Wir haben exzellente Bildergebnisse gesehen, die mit einem Kodak KAF 16803 Chip aufgenommen wurden, bei dem das scheinbare Gesichtsfeld einen Durchmesser von 50mm hat.

Celestron EdgeHD 1400



## **A02 - Zusammenfassung**

Das klassische SC Teleskop, entwickelt und über Jahrzehnte produziert von CELESTRON, hat weltweit zehntausende von Naturliebhabern zur Amateurastronomie gebracht und bildete über lange Zeit das Basisteleskop für eine ganze Generation von Amateurastronomen.

Durch die Einführung neuen Zubehörs wie Superweitwinkel-Okularen und bezahlbaren Vollformat DSLR Kameras wollen heutige Amateurastronomen für ihre Beobachtungen ein leistungsfähigeres Instrument nutzen können, als es das klassische SC Teleskop sein kann. Dabei sollte es ein gutes und günstiges Preis/Leistungsverhältnis haben.

Bei der Entwicklung des neuen EdgeHD SC Teleskops hatte CELESTRON sich folgende Wünsche als Ziel gesetzt: Eine gute optische Abbildung bis weit außerhalb der optischen Achse, ein großes fotografisches Feld mit „nadelscharfen“ Sternabbildungen bis in die Ecken eines Vollformatchips und ein bezahlbarer Kaufpreis.

Wir haben in dieser Publikation die Entwicklung, die sorgfältige Produktion und die vielen Testmethoden des neuen Teleskopdesigns beschrieben und sind uns sicher, dass das EdgeHD Teleskop ein perfekter Nachfolger für die heutigen Ansprüche von Amateurastronomen ist - wie es für über 40 Jahre das klassische Schmidt-Cassegrain Teleskop von Celestron war.

## **A03 – Literaturhinweise**

Für Leser, die tiefer in die Materie von Teleskopoptik einsteigen wollen

DeVany, Arthur S., Master Optical Techniques.  
John Wiley and Sons, New York, 1981.

Fischer, Robert E.; Biljana Tadic-Galeb; and Paul R. Yoder,  
Optical System Design. McGraw Hill, New York, 2008.

Geary, Joseph M., Introduction to Lens Design.  
Willmann-Bell, Richmond, 2002.

Malacara, Daniel, ed., Optical Shop Testing.  
John Wiley and Sons, New York, 1978.

Rutten, Harrie, and Martin van Venrooij, Telescope Optics: A Comprehensive Manual for Amateur Astronomers.  
Willmann-Bell, Richmond, 1999.

Smith, Gregory Hallock, Practical Computer-Aided Lens Design.  
Willmann-Bell, Richmond, 1998.

Smith, Gregory Hallock; Roger Ceragioli; Richard Berry, Telescopes, Eyepieces, and Astrographs: Design, Analysis, and Performance of Modern Astronomical Optics.  
Willmann-Bell, Richmond, 2012.

Wikipedia. Search references to specific topics. See:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_lens\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_lens_design)  
and many associated links.

Wikipedia. Search references to T- mount. See:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/T-mount>  
and associated camera system links.

Wilson, R. N., Reflecting Telescope Optics I and II.  
Springer- Verlag, Berlin, 1996.

ZEMAX® Optical Design Program, User's Guide.  
Radiant Zemax LLC, Tucson, 2012.

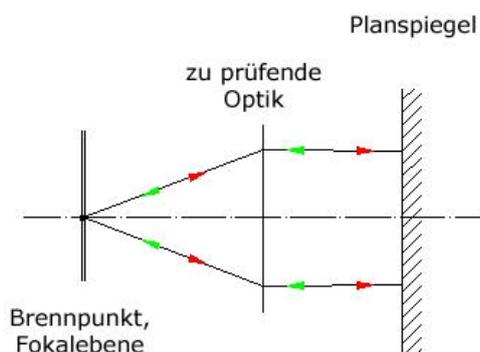
[http://de.wikipedia.org/wiki/Sph%C3%A4rische\\_Aberration#Sph.C3.A4rische\\_Aberration](http://de.wikipedia.org/wiki/Sph%C3%A4rische_Aberration#Sph.C3.A4rische_Aberration)

## A 04 - Glossar einiger Fachbegriffe

### Aberration

hier: optischer Bildfehler

### Autokollimation



Unter Autokollimation versteht man einen [optischen](#) Aufbau, bei welchem ein [kollimiertes](#) (paralleles) Lichtbündel ein optisches System verlässt und durch einen Planspiegel wieder in das System zurückgeworfen wird (**rot** = Hinweg, **grün** Rückweg des Strahlenbündels).

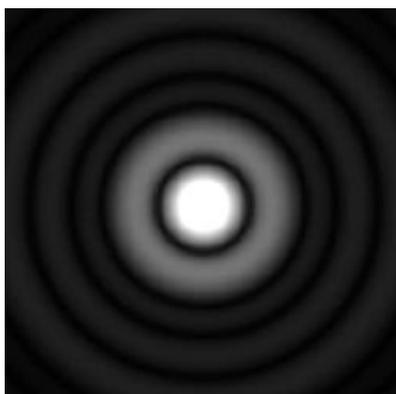
Dazu muss sich die Lichtquelle exakt in der Fokalebene der zu prüfenden Optik befinden. Der Vorteil der Autokollimation ist der, dass das Licht die zu prüfende Optik zweimal durchläuft und Fehler der Optik dadurch doppelt so groß erscheinen. Der reflektierende Planspiegel muss dazu von außerordentlich hoher optischer Güte sein (Abbildung: Quelle

Wikipedia).

### Aplanate, Aplanasie, bzw. aplanatisches optisches System

bezeichnet ein Spiegelsystem oder ein Objektiv, welches frei von **sphärischer Abberation** ist.

### Beugungsscheibchen und Beugungsbegrenzte Auflösung



Licht wird wegen seiner Wellennatur an der [Blendenöffnung](#) (z.B. Fassung der Schmidtplatte) [gebeugt](#). Daher kann das Bild eines Objektpunktes kein idealer Punkt sein, sondern wäre auch bei perfekter Korrektur aller geometrisch-optischen Abbildungsfehler ein Lichtfleck.

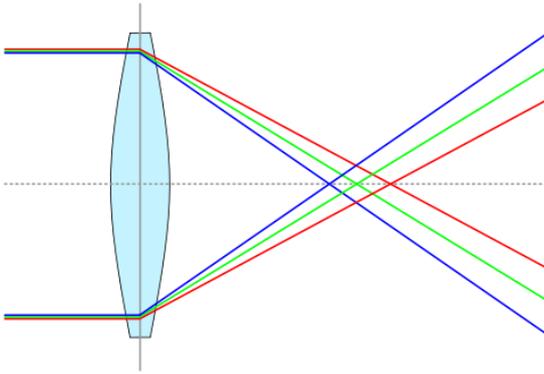
Wenn das von der Blende ausgeschnittene Strahlenbündel einen kreisrunden Querschnitt hat, ist dieser Lichtfleck ein kreisrundes, von schwachen, konzentrischen Ringen umgebenes [Beugungsscheibchen](#).

Bei unendlich weit entferntem Objekt berechnet sich sein

Durchmesser zu  $d = 2,44 \cdot \lambda \cdot k$ . Dabei ist  $\lambda$  die [Wellenlänge](#) des Lichts und  $k$  die [Blendenzahl](#) (Kehrwert des Öffnungsverhältnisses). Daraus kann man die Faustregel ableiten: Der Durchmesser des Beugungsscheibchens ist die Blendenzahl in  $\mu$ .

Die Beugung kann nicht durch Korrektionsmaßnahmen vermindert werden. Im Idealfall sind die geometrisch-optischen Abbildungsfehler völlig korrigiert, so dass die Bildschärfe nur von der Beugung bestimmt wird. Anderenfalls wird die Bildqualität durch die Abbildungsfehler mehr oder weniger beeinträchtigt. Ist diese Beeinträchtigung nur gering, spricht man von einer beugungsbegrenzten Optik. Oder anders ausgedrückt, werden annähernd alle Lichtstrahlen innerhalb des Beugungsscheibchens gebündelt, spricht man von einer beugungsbegrenzten Abbildung (Abbildung: Quelle Wikipedia).

### Chromatische Abberation, Chromasie oder Restfarbfehler



Der [Brechungsindex](#) von [optischem Glas](#) hängt von der [Wellenlänge](#)  $\lambda$  des einfallenden Lichts ab. Diese Erscheinung wird [Dispersion](#) genannt. Sie ist die Ursache für die chromatische Aberration.

Einfach ausgedrückt: eine einfache Linse hat für die verschiedenen monochromatische Farben (aus denen weißes Mischlicht zusammen gesetzt ist) unterschiedliche Brennweiten.

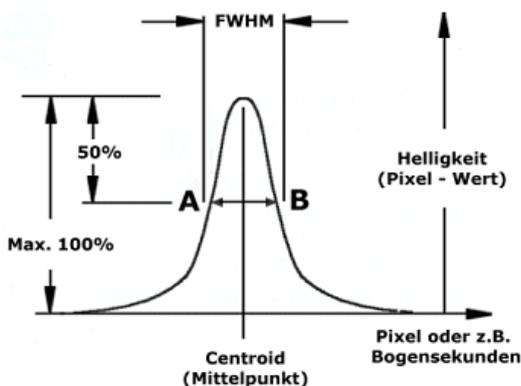
Setzt man Optiken aus mehreren Linsen mit unterschiedlichen Brechungsindizes zusammen, kann man diesen Restfarbfehler bis auf nahezu Null reduzieren.

Da die Schmidplatte eine einfache „Linse“ ist, bleibt ein Restfarbfehler sichtbar (Abbildung: Quelle Wikipedia).

### Durchstoßdiagramm, Spotdiagramm

Das Spot- oder Durchstoßdiagramm ist ein unentbehrliches Hilfsmittel bei einer jeden Konstruktion eines optischen Systems. Es simuliert die Fokalebene z.B. eines Teleskops, aber auch beliebige Ebenen sowohl Extra- als auch Intrafokal. Durch die Vorgaben des optischen Systems, z.B. Brennweite, Öffnungsverhältnis, Krümmungsformen der optischen Elemente, Wellenlänge des Lichtes und vieler anderer Koeffizienten der Optik, berechnet die Software das Beugungsbild einer Optik in Abhängigkeit der Höhe der einfallenden Strahlen zur optischen Achse mit allen resultierenden Bildfehlern und stellt sie als graphisches Bild dar. Durch Änderung eines beliebigen Parameters sieht der Konstrukteur sofort, wie sich die Änderung auf der optischen Achse und abweichend davon bemerkbar macht.

**FWHM** ist eine Abkürzung für „Full Width at Half Maximum“



"Full Width at Half Maximum" ist ein Begriff, der etwas über die Qualität (letztlich über die Bildschärfe) einer fotografischen Aufnahme in Abhängigkeit der Optik (konstant) UND des Seeings (variabel) während der Belichtung aussagt. Die FWHM-Kurve ist im Normalfall eine typische Gauß'sche Glockenkurve und zeigt das Helligkeitsprofil eines Sternes, aufgetragen in einem rechtwinkligem Koordinatensystem.

Die hellsten Pixel befinden sich oben an der Spitze der Kurve und dort konzentrieren sich auch die meisten Pixel. Den Mittelpunkt nennt man auch das Centroid.

Im Prinzip kann man die Abbildung auch als die Graphik eines Beugungsbildes sehen. Der Begriff des FWHM wird nun bei genau 50 % der maximalen Bildhelligkeit (Linie A - B) gemessen.

Es ist nachvollziehbar, dass man bei bekannter Brennweite und Teleskopöffnung für eine annä-

hernd beugungsbegrenzte Optik den Wert für das FWHM ausrechnen kann. Ebenfalls nachvollziehbar ist, dass der Wert des FWHM z.B. stark von der Fokussierung und dem Seeing abhängig ist. Die Differenz zwischen der Theorie und dem gemessenen Wert des FWHM zeigt die Qualität des Seeing – vorausgesetzt, die Optik arbeitet annähernd beugungsbegrenzt.

### Geometrische- und Winkelmaße

1 mü = 1 Mikrometer = 1/1000 Millimeter = 0,001 mm

10 mü = 1 Mikrometer = 1/100 Millimeter = 0,01 mm

1 Grad = 60 Bodenminuten, 1 Bogenminute = 60 Bogensekunden, 30 Bogensekunden = 0,5 Bogenminuten

### Lichtwellenlänge

Die Wellenlänge des Lichtes wird entweder in Å (Angström) oder in Nanometer (Milliardstel Meter = Millionster Millimeter) angegeben. 1nm = 10 Å. Gängige Prüfwellenlängen in der Optik sind rot = 656,3nm, grün = 532nm und blau = 486nm. Das menschliche Auge kann etwa Wellenlängen zwischen 400 (Ultraviolett) und 750nm (sehr dunkles Rot) wahrnehmen.

### Komafehler

Die Koma (Asymmetriefehler) entsteht bei schräg zur optischen Achse einfallendem Strahlenbündel durch eine Überlagerung zweier Abbildungsfehler: der auch bei achsparallelem Bündel wirkenden **sphärischen Aberration** und dem Astigmatismus schiefer Bündel.



Anstelle eines scharfen Beugungsscheibchens entsteht ein Bildpunkt mit zum Rand der Optik gerichtetem „Schweif“, der dem Phänomen den Namen gibt. Durch Abblenden der Randstrahlen kann die Erscheinung gemindert werden, der Astigmatismus schiefer Bündel bleibt aber bestehen.

Koma kann sowohl bei Linsen als auch bei Spiegeloptiken auftreten. [Aplanate](#), also Objektive, bei denen sphärische Aberration vollständig korrigiert ist, sind komafehlerfrei.

### Obstruktion

Obstruktion bedeutet Abdeckung, Abschattung. Bei vielen Teleskopen wie z.B. einem Newton oder auch einem EdgeHD wird der Hauptspiegel durch den Fangspiegel obstruiert, denn er sitzt im Strahlengang des einfallenden parallelen Strahlenbündels **VOR** dem Hauptspiegel. Damit reduziert er auch die effektiv wirksame Fläche des Hauptspiegels. Ein Refraktor z.B. ist obstruktionsfrei und zeigt deshalb – gleichen Durchmesser der Optik vorausgesetzt – deutlich schärfere und kontrastreichere Bilder, denn die Obstruktion beeinflusst auch das Beugungsscheibchen. Je größer sie ist, desto mehr Licht wird in den ersten Beugungsring gestreut.

Obstruktion und **Vignettierung** hängen konstruktiv zusammen. Würde man den Fangspiegel in den EdgeHD Teleskopen deutlich größer im Durchmesser machen, würde die Vignettierung reduziert. Gleichzeitig würde aber die Obstruktion größer. Wie schon an früherer Stelle geschrieben, ist die Optimierung eines optischen Systems eine „Gratwanderung“

### Öffnungsverhältnis, Öffnungszahl (Blendezahl)

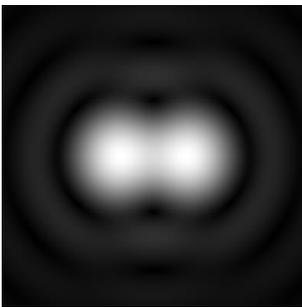
benennt das Verhältnis zwischen Brennweite und freier Eintrittsöffnung eines optischen Systems. Das EdgeHD 800 mit Brennweite = 2125mm und Öffnung = 203mm hat z.B. ein Öffnungsverhältnis von f/10,5. Die Öffnungszahl ist der Kehrwert, also 10,5 – die Brennweite ist 10,5 mal größer als die effektive Öffnung. Im direkten Vergleich zu einem Fotoobjektiv hat das EdgeHD also die „Blendezahl“ 10,5.

Das Öffnungsverhältnis oder die Öffnungszahl ist ein Maß für die Bildhelligkeit von flächenhaften Objekten (nicht von punktförmigen Sternen) in der Fokalebene des Teleskop. Je kleiner der Wert, desto heller das Bild. Beispiel: Das Öffnungsverhältnis von f/5 liefert hellere Bilder als ein System von f/10 (gleiche Teleskopöffnung vorausgesetzt).

### Rayleigh Kriterium und Dawes Limit

Das Rayleigh Kriterium gibt den Abstand (in Bogensekunden) zweier gleich heller, punktförmiger Lichtquellen an, die ein Teleskop trennen kann (Doppelstern). Dieser Mindestabstand gleich dem Abstand des ersten Minimums vom Zentrum des Beugungsmusters. Das Kriterium gilt für eine perfekte Optik und ist – oft – ein theoretischer Wert. Die Faustformel dafür lautet:  $1,22 \times (\lambda/d)$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes und  $d$  = der Durchmesser der Teleskopöffnung ist. Die Einsenkung zwischen den beiden Beugungsscheibchens beträgt ca. 30%.

Das Dawes Limit gibt auch das Auflösungsvermögen – also die Trennschärfe – eines Teleskops an. Sie gilt ebenfalls als Abstand im Bogenmaß zwischen zwei gleich hellen, punktförmigen Lichtquellen. Es gilt folgende Faustformel:  $\alpha = (4,56/d)$ , wobei  $d$  die Teleskopöffnung in Zoll ist.



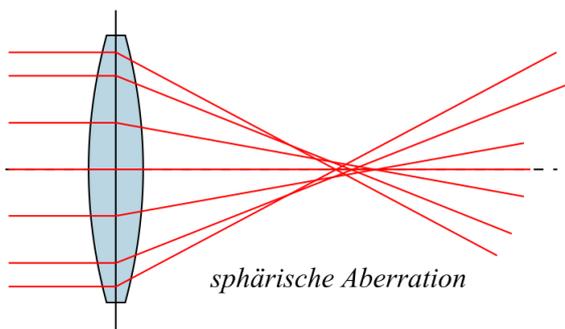
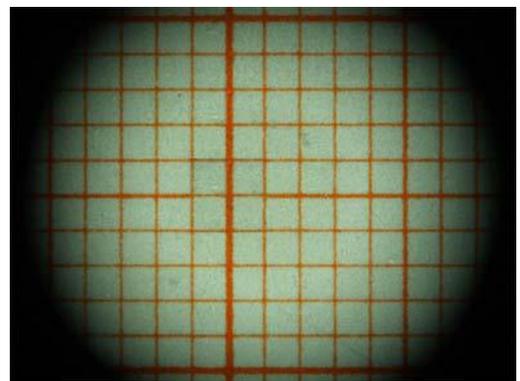
Beide errechneten Werte für das Auflösungsvermögen einer Optik werden in der Praxis auf Grund der wechselnden Seeinbedingungen selten erreicht.

Der einzige Wert des Teleskopsystems, der in beide Formeln eingeht, ist die Teleskopöffnung  $d$ . Je größer  $d$ , desto höher ist das Auflösungsvermögen der Optik.

### Sphärische Abberation

Sphärische [Aberration](#) ist ein aus der sphärischen [Krümmung](#) der [Flächen](#) der Spiegel entspringender [Fehler](#) der optischen [Instrumente](#) und der von ihnen erzeugten Bilder.

Die sphärische Aberration, auch Öffnungsfehler oder Kugelgestaltsfehler genannt, ist ein Schärfefehler und bewirkt, dass achsparallel einfallende oder vom gleichen Objektpunkt auf der [optischen Achse](#) ausgehende Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch das System nicht die gleiche [Schnittweite](#) haben.



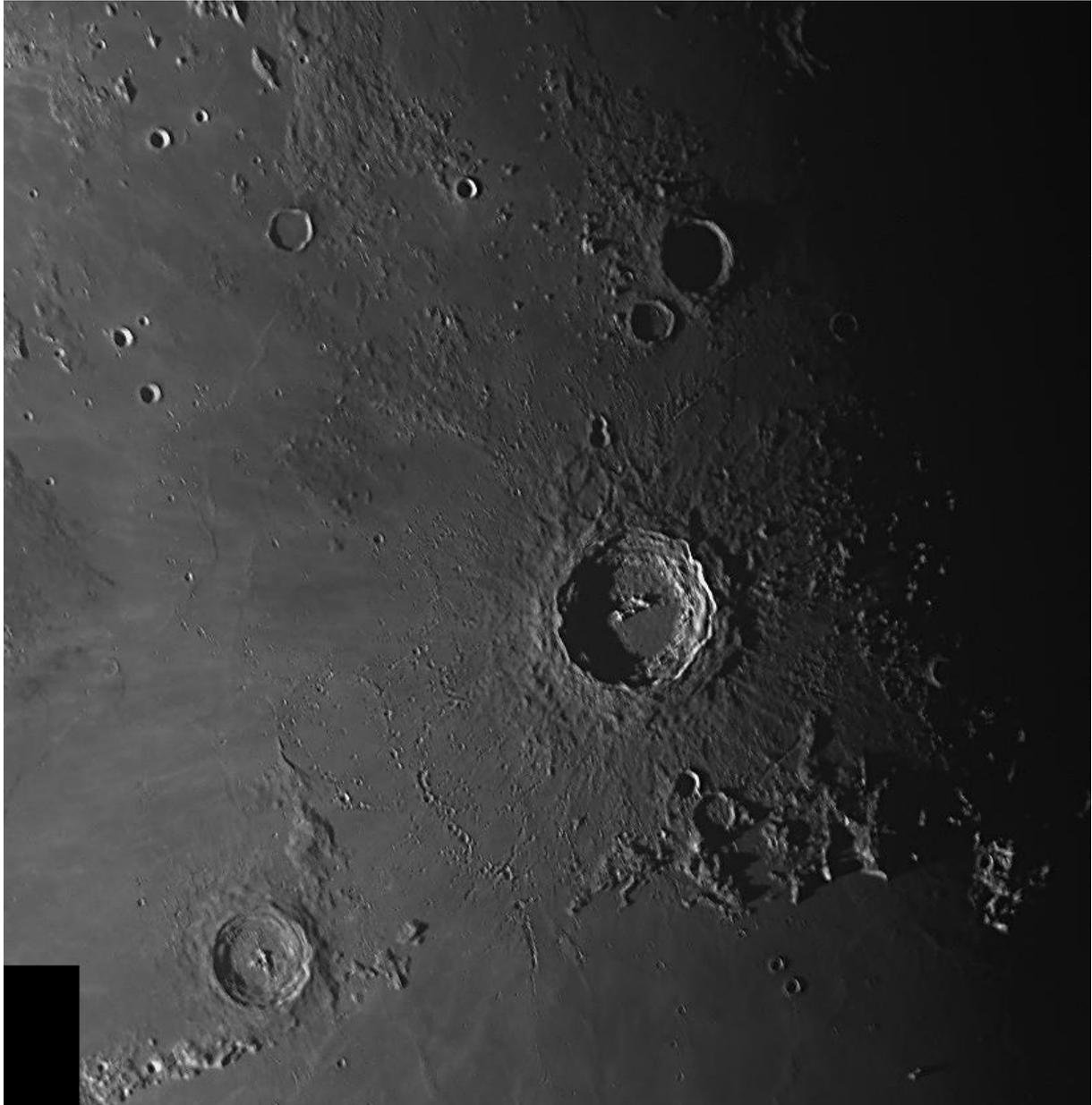
Sie laufen somit nicht in einem Punkt zusammen. Im Allgemeinen ist die Abweichung umso stärker, je weiter außen der Strahl verläuft. Einfach ausgedrückt: in Funktion der Höhe zur optischen Achse einfallende parallele Strahlenbündel haben unterschiedliche Brennweiten, wobei es egal ist ob sie ein Objektiv mit sphärischen Krümmen durchlaufen (wie oben im Bild dargestellt ist) oder an einer konkaven oder konvexen Spiegeloberfläche reflektiert werden (Abbildung: Quelle Wikipedia).

**Sphäre** = Kugeloberfläche. Konkav gekrümmt = Hauptspiegel, konvex gekrümmt = Fangspiegel.

## **Vignettierung**

Unter dem Begriff Vignettierung versteht man einen Lichtabfall zum Rand des Gesichtsfeldes hin. Wird ein Bildfeld bis zum äußersten Rand hin gleichmäßig (100%) ausgeleuchtet, so ist die Vignettierung Null Prozent.

Jedes abbildende optische System hat Vignettierung, die durch eine Vielzahl von Ursachen entstehen kann. Natürlich wird bei der Konstruktion einer Optik versucht, die Vignettierung möglichst gering zu halten.



Die Mondkrater Kopernikus und Eratosthenes, aufgenommen am 2.3.2012 um 18:40UT mit einem EdgeHD 925 im Primärfokus und einer DMK 31 von The Imaging Source. Mosaik aus zwei Teilbildern.

© 2013 W. Paech/Astrotech Hannover + Baader Planetarium GmbH Mammendorf.  
Alle Angaben vorbehaltlich technischer Änderungen durch Celestron International



**BAADER PLANETARIUM** G  
M  
B  
H

Zur Sternwarte 4 • D-82291 Mammendorf • Tel. +49 (0) 8145 / 8089-0 • Fax +49 (0) 8145 / 8089-105  
[www.baader-planetarium.com](http://www.baader-planetarium.com) • [kontakt@baader-planetarium.de](mailto:kontakt@baader-planetarium.de) • [www.celestron.de](http://www.celestron.de)