

BILDFEHLER (ABERRATIONEN) OPTISCHER SYSTEME UND DEREN EINFLÜSSE AUF DIE ABBILDUNG

von ASTRO-PHYSICS (Roland Christen)



(Sinngemäß aus dem Englischen übersetzt und korrigiert von Bernd Flach-Wilken, V.d.S. Fachgruppe ASTROPHOTOGRAPHIE)

Die 5 Seidel'schen monochromatischen Bildfehler lauten:

- 1.) sphärische Aberration
- 2.) Koma
- 3.) Astigmatismus
- 4.) Bildfeldwölbung (-krümmung)
- 5.) Verzeichnung

Optische Systeme sind mit diesen 5 monochromatischen Abbildungsfehlern behaftet, die die Abbildungsqualität sowohl für die visuelle als auch die photographische Beobachtung einschränken. Im folgenden werden die Bildfehler der Reihe nach vorgestellt und ihr Einfluß auf die Abbildung erläutert. In der Regel sind teure und komplexe Optiken besser korrigiert als deren einfacher zusammengestellte und preiswertere Gegenstücke. Die 5 Seidelfehler sind in der Regel für nur eine bestimmte Lichtwellenlänge korrigiert. In der Praxis zeigt sich jedoch, daß eine gute Korrektur dieser Fehler im gelbgrünen Spektralbereich eine kaum nachlassende Korrektur an den Enden des visuellen Spektrums bedeutet (rot und violett/blau).

Die drei chromatischen Bildfehler lauten:

- 1.) Farblängsfehler
- 2.) Farbquerfehler
- 3.) Sphärochromasie

Viele Linsensysteme (auch katadioptrische, also Mischsysteme aus Spiegeln und Linsen) sind stark mit chromatischen Bildfehlern behaftet. Von den 3 genannten ist der erste Fehler der am schwierigsten zu beseitigende und es bedarf dazu häufig besonderer Gläser die in der Regel auch im Preis exotisch sind. Allerdings garantiert die Verwendung eines solchen Glases noch lange kein hochkorrigiertes Objektiv: sie müssen mit viel Wissen und Erfahrung an der richtigen Stelle mit den richtigen Parametern eingesetzt werden. "Spektakuläre" Werbeaussagen der Hersteller sind hier mit der entsprechenden Vorsicht zu betrachten.

Es gibt Optikfirmen, die ihren Kunden erklären: ist ein Refraktorobjektiv sowohl für die C-(rot) als auch die F-(blau) Wellenlänge chromatisch korrigiert, so ist es auch für sämtliche Zwischenwellenlängen "fokussiert". Sie nennen ihre C-F "Achromaten": voll farbkorrigiert. Das ist nicht wahr! Für sämtliche Wellenlängen außer C und F trifft dies nicht zu. Außer C-F optimierten Objektiven gibt es d-g oder e-h korrigierte(siehe S.8/ Skizze bei "Farblängsfehler"): dies aber ändert nichts an der Tatsache, daß in anderen Wellenlängenbereichen z.T. beträchtliche Farblängsfehler bestehen bleiben. Es gibt keine Kniffe, den Farblängsfehler eines 2-linsigen Achromaten zu beseitigen. Auch der oft benutzte Trick, den Farblängsfehler einfach zu übersehen, da doch der Objektivpreis der exotischen Gläser wegen so enorm hoch war und Teures doch auch gut sein muß, führt nicht weiter. Jeder unvoreingenommene Beobachter wird den Farbfehler sehen. Farbquerfehler und Sphärochromasie sind in der Praxis kaum störend, es sei denn, die gesamte Objektivkonstruktion ist ungewöhnlich schlecht oder das System wurde nicht wenigstens in einer Wellenlänge (z.Bsp. grün) sphärisch aberrationsfrei korrigiert.

Betr. Ihre Bedenken bezüglich unserer Informationsschrift "opt. Aberrationen und ihre Beurteilung".

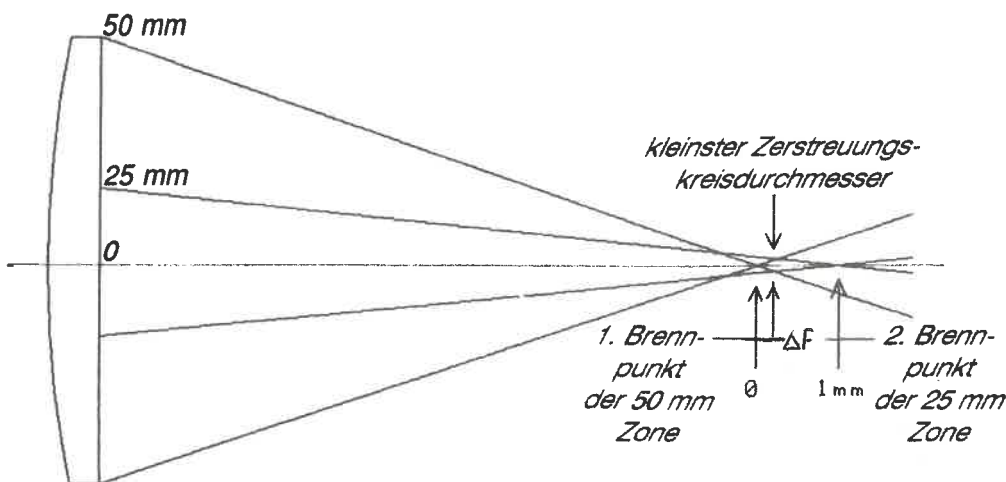
Sehr geehrter Herr Baader,

Unsere Angaben zum Lichtverlust bei Schmidt Cassegrain Systemen stammen aus der Analyse eines Meade 8"/f10 Teleskopes aus unserem Besitz. Die zentrale Abschattung des Gerätes beträgt 37,5% des Durchmessers (76 mm); d.h. 14,1% der Öffnung. Die Abschattung durch die Fangspiegelhalterung ist beim Celestron 8 nach unserem Wissen geringer, sie beträgt 69 mm. (Nicht berücksichtigt ist das neue Meade 8"/f6,3 Schmidt Cassegrain. Hier beträgt die Abschattung durch den Fangspiegel fast 17% der Öffnung und ein weiterer Lichtverlust tritt auf durch die verstärkte Notwendigkeit zur Unterdrückung der Randstrahlen 'Koma'. Rechnerisch ist dieses System nicht besser als ein 4" - Fraunhofer - Refraktor.)

Es ist keinesfalls unser Anliegen, das Schmidt Cassegrain System als erste Wahl des Amateurs schlecht zu machen. Für die überwiegende Anzahl von Amateuren wird das C8 immer die richtige Wahl bleiben. Unser Kunde ist der fortgeschrittene Beobachter, der mit Geräten arbeiten möchte wie sie bis vor kurzem nur wissenschaftlichen Institutionen vorbehalten waren.

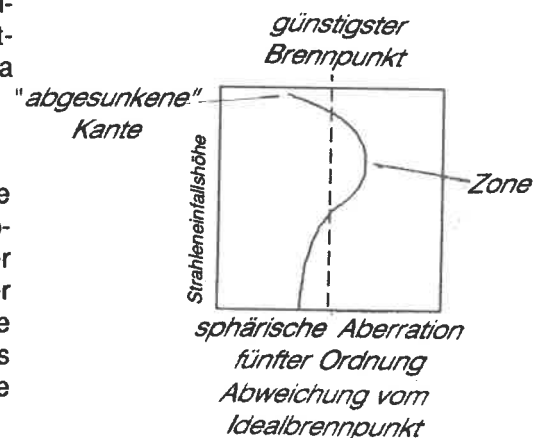
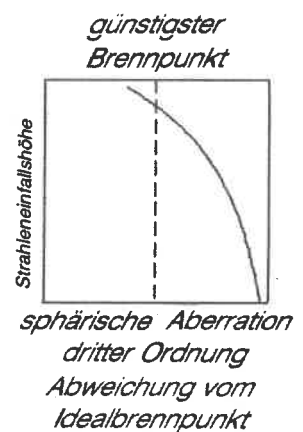
Mit freundlichen Grüßen, ASTRO PHYSICS/ Rockford / Illinois

SPHÄRISCHE ABERRATION

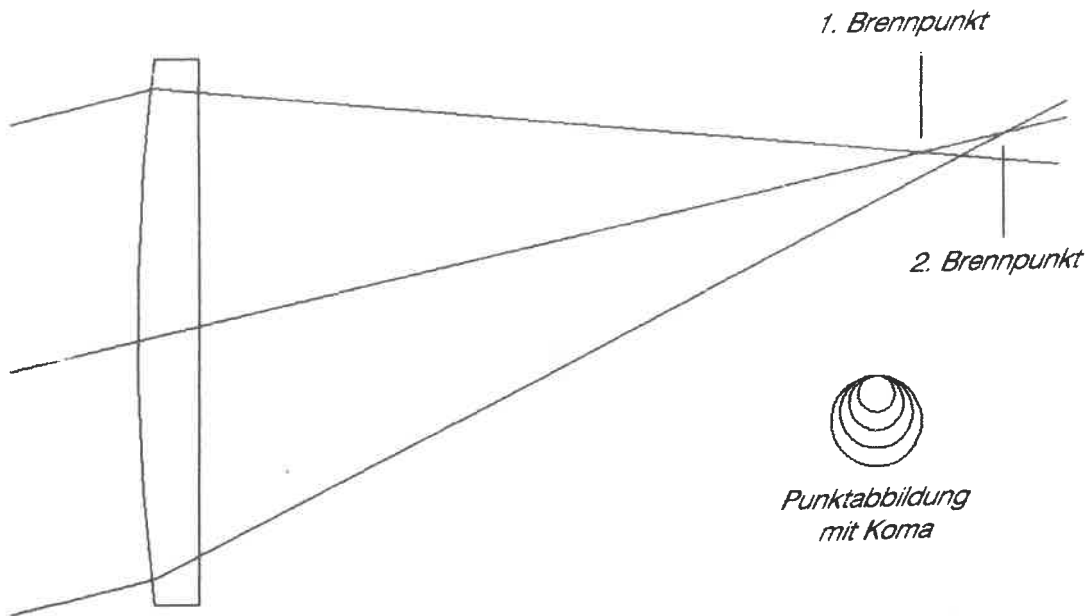


Die Skizze oben zeigt das Entstehen der sphärischen Aberration. Der Brennpunkt der äußeren durch das Objektiv gehenden Lichtstrahlen liegt etwa 0,1 mm vor dem Brennpunkt der durch die Objektivmitte zielenden Lichtstrahlen. Es ergibt sich in etwa eine quadratische Abhängigkeit zwischen dem Lichtstrahlenabstand von der Objektivachse (Strahlhöhe) und der jeweiligen dazugehörigen Fokusdifferenz. Dies verdeutlicht die rechte Graphik. Der günstigste Fokuskompromiss liegt in etwa im vorderen Viertel der Fokuszone.

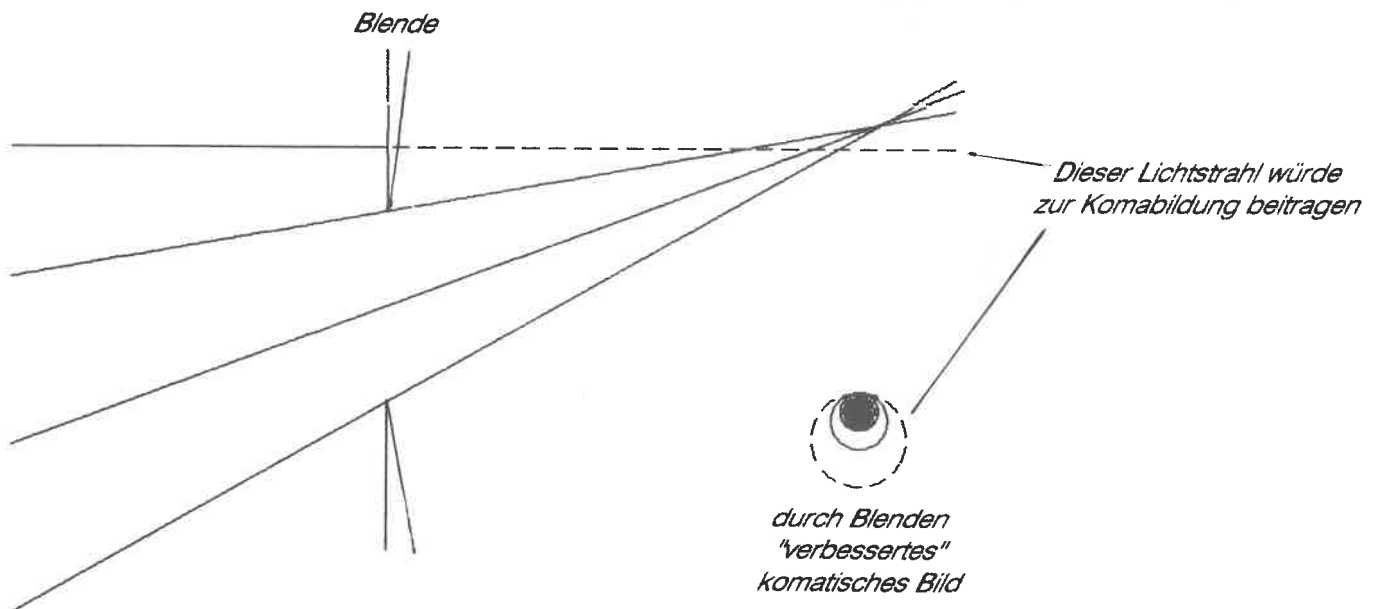
Setzt sich ein Objektiv aus mehreren Linsengruppen zusammen, die voneinander einen im Vergleich zum Objektivdurchmesser nicht unerheblichen Luftabstand haben, so ergibt sich eine Aberrationskurve höherer Ordnung, wie das Beispiel rechts zeigt. In einem solchen Fall muß der optimale Fokus graphisch ermittelt werden. Man erkennt verschiedene Brennweitenzonen. Diese Zonen wirken sich in der Praxis störender aus als sphärische Aberrationen niedrigerer Ordnung wie sie das obere Beispiel zeigt.



KOMA

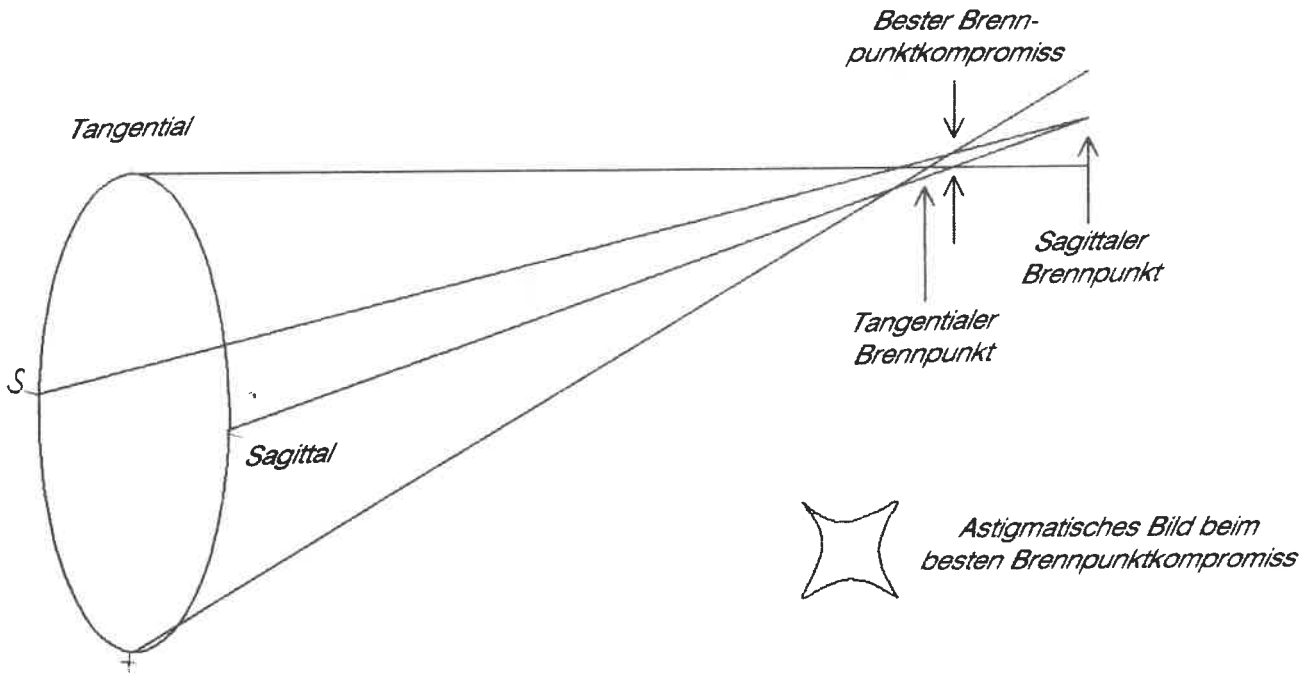


Eine Glaslinse zeigt Komafehler außerhalb der optischen Achse, wenn diese aus verschiedenbrennweitigen Zonen "zusammengesetzt" ist. In einfachsten Linsen kann ungenügender Schliff die Ursache sein. Wurde das Objektiv asphärisiert, um die sphärische Aberration in den Griff zu bekommen - so geschieht dies auf Kosten einer anwachsenden Koma bei schräg einfallenden Lichtstrahlen. Bei mehrlinsigen Objektivsystemen kann der Komafehler entstehen, wenn die Linsenabstände nicht stimmen oder bei der Objektivrechnung nicht optimiert wurden. Das bekannteste Beispiel hierfür sind Schmidt-Cassegrain Systeme, deren Korrekionsplatte in der Nähe des Sekundärspiegels sitzt: die Möglichkeit einer guten Komakorrektur wurde zugunsten einer kurzen Bauweise geopfert! Die resultierende Koma wäre für einen Beobachter sehr störend, würde nicht ein "primitiver" Trick angewandt, um diese zu verkleinern: der "komatische" Teil der außeraxialen Lichtstrahlen wird einfach ausgeblendet, das System vignettiert, Lichtverlust außerhalb der Achse ist die Folge.



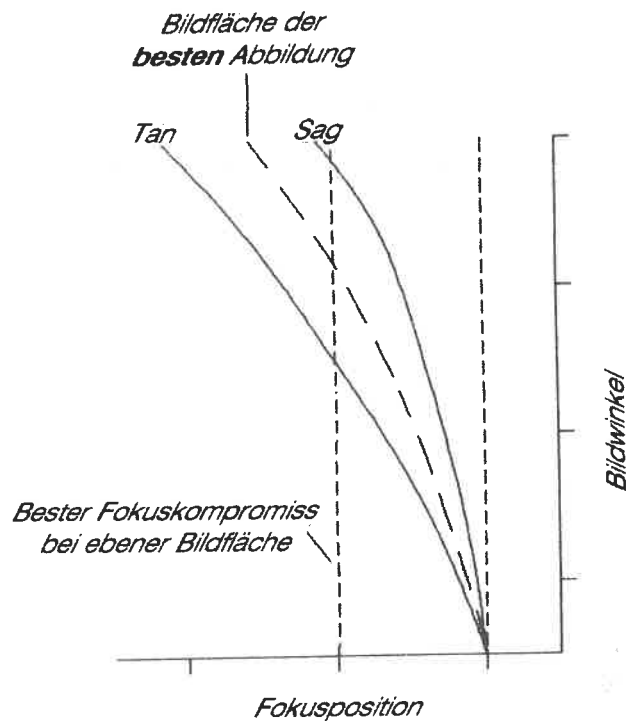
Mit sorgfältig berechneten Systemblenden wird die außeraxiale Koma soweit verringert, daß das Bild auch am Bildfeldrand recht scharf wirkt. Die Vignettierung kann allerdings Größenordnungen von 50 - 60% erreichen!

ASTIGMATISMUS

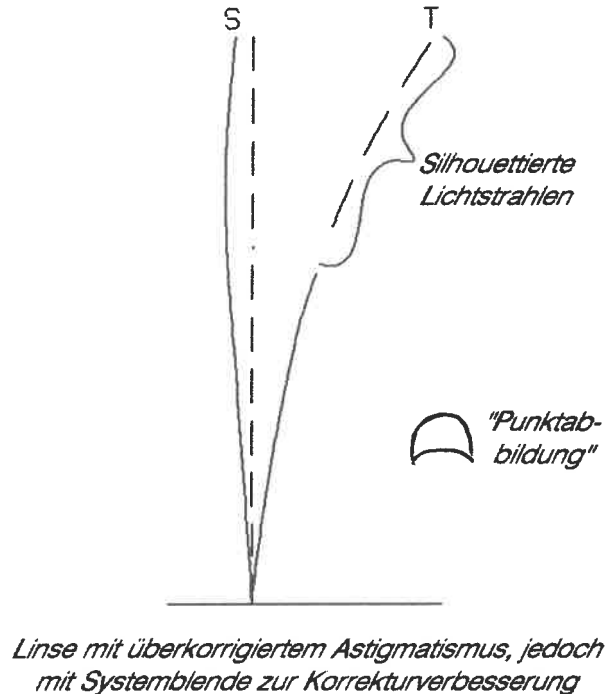
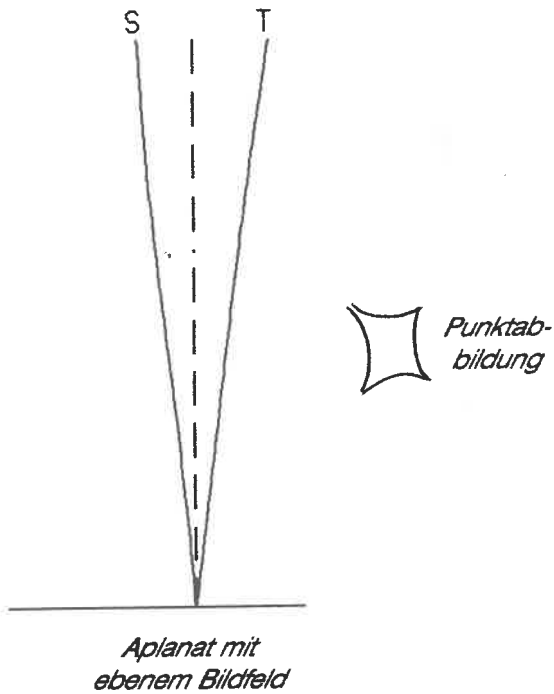


Astigmatismus entsteht, wenn außeraxial tangential (T-T) einfallende Lichtstrahlen eine andere Brennweite aufweisen als deren sagittal (S-S) einfallende "Verwandte". Die oben gezeichnete Skizze verdeutlicht dies. Werden, wie rechts im Diagramm geschehen, die resultierenden Fokuspunkte in Abhängigkeit vom Lichteinfallswinkel aufgetragen, so zeigt sich, daß 2 Bildschalen mit unterschiedlichen Foki entstehen: eine tangentielle Bildschale und entsprechend eine sagittale. Die hier gezeigte Linse zeigt keinerlei Komafehler - sie wird auch Aplanat genannt: es existiert genau zwischen den beiden Bildschalen eine -in diesem Fall gekrümmte - weitere Bildschale, in welcher die Bildpunkte ihre kleinste Ausdehnung annehmen. Diese sind nicht rund, sondern nehmen wie oben gezeigt eine leicht viereckige Form an, eine Synthese aus den senkrecht aufeinanderstehenden beiden Astigmatismusellipsen.

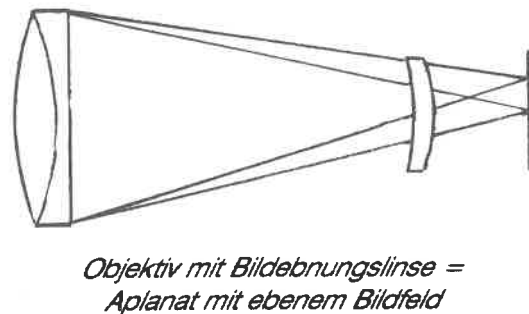
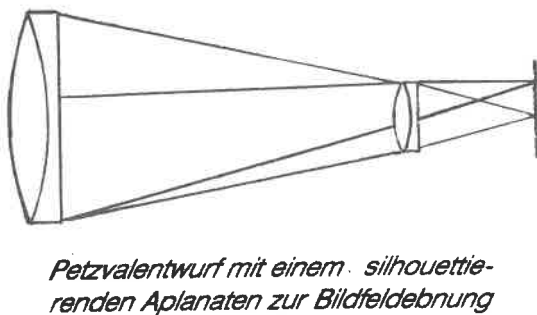
In komplexen optischen Systemen kann sowohl die sagittale als auch die tangentielle Bildschale symmetrisch vor bzw. hinter eine Ebene konstruiert werden, sodaß die Bildschale mit dem besten Fokuskompromiss eine Ebene ergibt: ein sog. Flat-Field-System. Je weiter die Bildpunkte von der optischen Achse entfernt sind, desto größer werden sie.



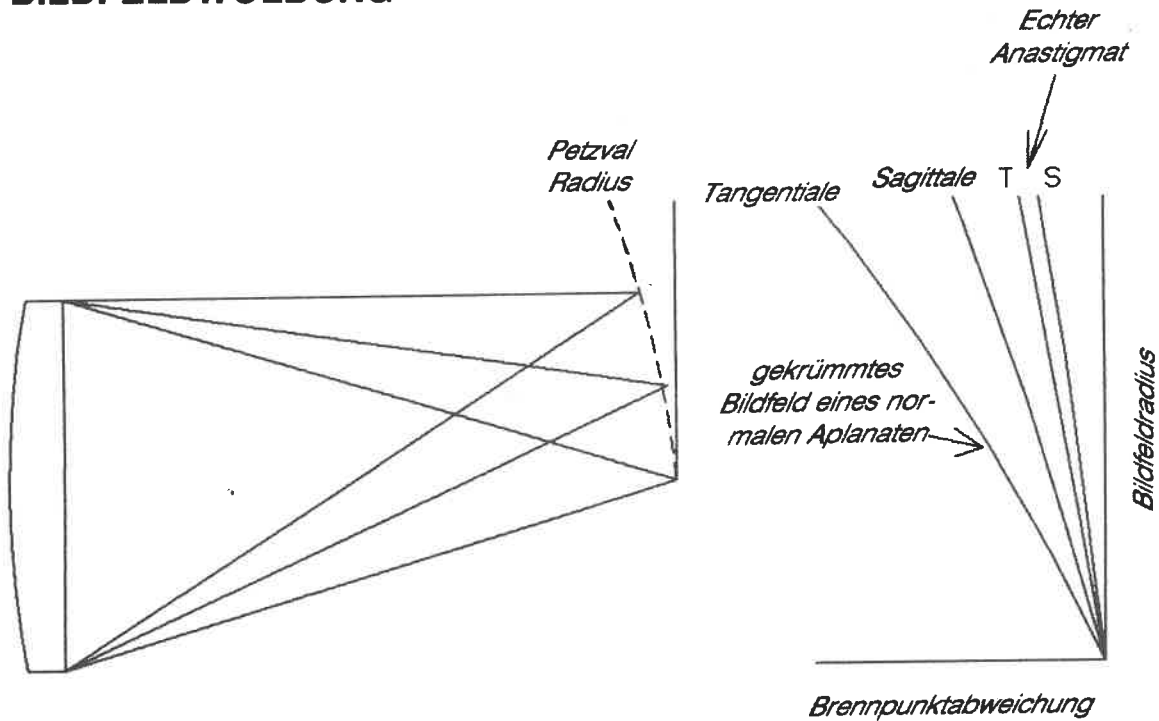
Dieses Beispiel zeigt die unten linksstehende Skizze. Rechts ist der Fall einer überkorrigierten tangentialen Bildschale gezeichnet (T), die sagittale Ebene hingegen ist nur leicht unterkorrigiert, bezogen auf eine gestrichelt gezeichnete Bildebene. Durch geeignete Blenden können diese überkorrigierten tangentialen Lichtstrahlen eliminiert werden: es entstehen im Vergleich zu vorher genanntem Beispiel kleinere außeraxiale Bildpunkte, die allerdings leicht vignettiert sind.



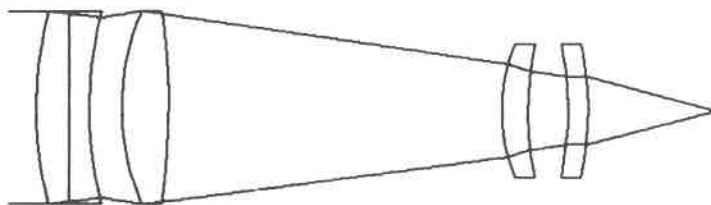
Orthoskopische- und einfache vierlinsige Plössokulare sind Beispiele für diese "Flat-Field" - Aplanate. In sogenannter "optimierter", was hier heißt: **vignettierter** Form werden diese Okulare mit verbesserter Randschärfe im Handel angeboten. Andere Beispiele für Aplanate sind das 4-linsige Petzvalsystem oder Objektive mit Bildfeldebnungslinsen in der Nähe der Filmebene.



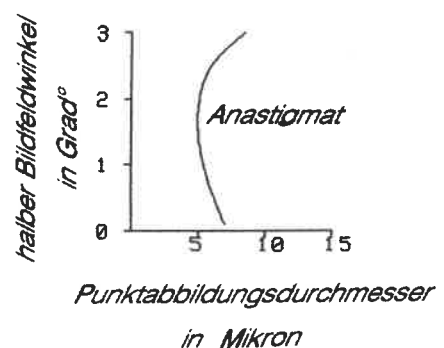
BILDFELDWÖLBUNG



Sind Koma und Astigmatismus nicht vorhanden, weisen alle einzelnen optischen Elemente Bildfeldwölbung auf. In zusammengesetzten Systemen ist die Gesamtbildfeldwölbung gleich der Summen der Wölbungen der einzelnen Elemente. Als Faustregel kann gelten: der Radius der Bildfeldwölbung (Petzvalradius) ist etwa das 1,5 fache der Linsenbrennweite. Der Petzvalradius ist also der Bildschalenradius in einem solchen optischen System, in dem sagittale und tangentielle Bildschale zusammenfallen. Ein solches System, bei welchem bei keinem Bildwinkel irgendeine Form von Astigmatismus auftritt, wenn nur der Film der Bildebene entsprechend gewölbt wird, heißt: anastigmatischer Aplanat. Die Bildpunkte auf der entsprechend dem Petzvalradius gewölbten Filmebene sind punktförmig und in ihrer Ausdehnung nur durch die Eintrittspupille beugungsbegrenzt. Auf einem ebenen, nicht gewölbtem Film wären die außeraxialen Bildpunkte oval, aber in ihrer Ausdehnung immer noch kleiner als bei einem normalen (d.h. mit Astigmatismus behafteten) Aplanaten. Um das Problem der Bildfeld(Film-)wölbung entsprechend dem Petzvalradius zu umgehen, kann man eine Bildfeldebnungslinse in das System einfügen. Die Bildschärfe ist hierbei über das ganze Bildfeld hinweg beugungsbegrenzt. Ein solches optisches System stellt einen Anastigmaten mit wahrem ebenen Bildfeld dar. Ein Beispiel für ein solches System zeigt unten stehende Skizze: ein anastigmatisches System, in welchem Bildfeldebnungslinsen in der Nähe der Filmebene zum Einsatz kommen.

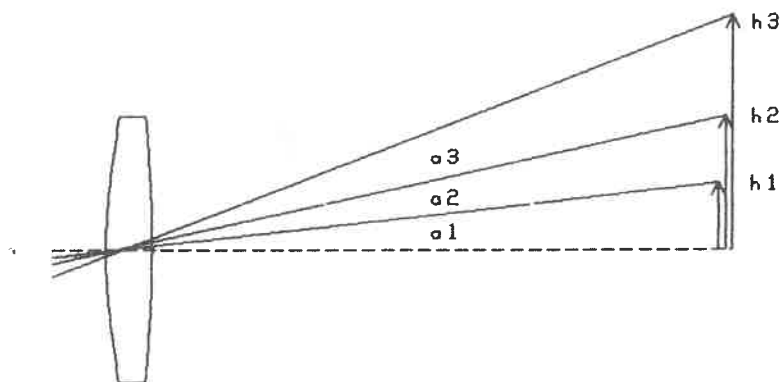


Beispiel für einen hochkorrigierten Flat Field Anastigmaten



VERZEICHNUNG

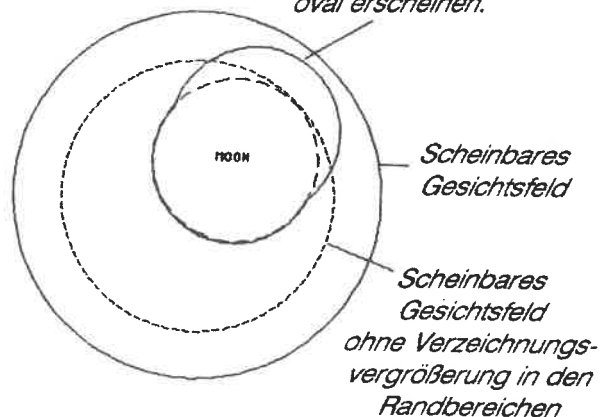
Um als astrographisches Objektiv Verwendung zu finden, muß die Objektivvergrößerung oder die Objektivbrennweite für jeden außeraxialen Bildwinkel die gleiche sein. Wäre dies nicht so, dann würden bestimmte Abstände in Bildfeldmitte anders bewertet werden als bei Abbildung der gleichen Abstände am Bildfeldrand. Tritt dieser Bildfehler auf, wird er nur bei genauer Bildanalyse bemerkt. Die Bildschärfe wird an keinem Bildpunkt beeinträchtigt - lediglich der Bildort verschiebt sich.



Ein Gegenstand, der unter dem Bildwinkel α_1 erscheint, wird als Bild der Größe h_1 abgebildet. Ein doppelt so großer Gegenstand α_2 sollte ein doppelt so großes Abbild h_2 haben. Ist h_2 aber größer als $2x h_1$, zeigt das Bild kissenförmige Verzeichnung. Ist h_2 kleiner als $2x h_1$, zeigt das Abbild tonnenförmige Verzeichnung. Im Gegensatz zu einigen Teleobjektiven für den "Hausgebrauch" zeigen weder Einzellinsensysteme noch Anastigmaten mit Bildfeldebnungselement bedeutende Verzeichnungswerte.

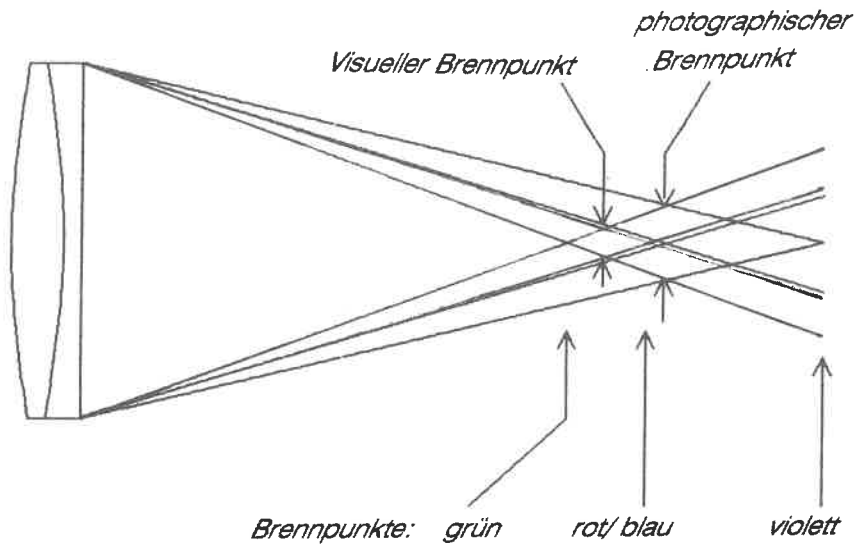
Bedeutende Verzeichnung allerdings zeigen in der Regel Okulare. Besonders einige Extremweitwinkeltypen zeigen an den Bildrändern im Original gerade Strukturen stark nach außen gewölbt und eigentlich runde Gebilde wie z.B. der Mond werden am Okularrand als nach außen gerichtete Ovale abgebildet. Durch diesen "Verzeichnungstrick" weist ein Okular mit 80° scheinbarem Bildfeld aber 15% Verzeichnung nur das reelle Bildfeld auf, welches ein nicht verzeichnendes Okular mit 68° scheinbarem Bildfeld zeigen würde.

Die kissenförmige Verzeichnung läßt den Mond am Bildfeldrand oval erscheinen.

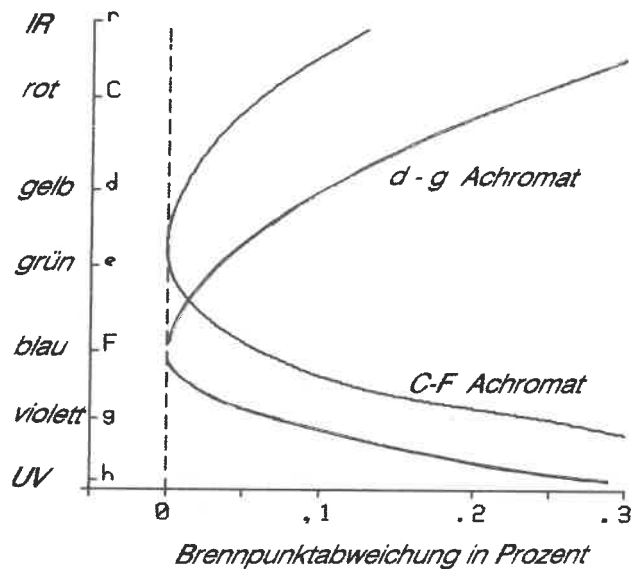


FARBLÄNGSFEHLER

Der Farblängsfehler, auch sekundäres Spektrum genannt, ist der am schwierigsten zu korrigierende Abbildungsfehler, den Glaslinsen besitzen. Auch wenn das Objektiv einen gemeinsamen Fokus für die C-(rot) als auch die F(blau)-Wellenlängen besitzt, liegen die Foki der anderen Farben z.T. beträchtlich vor oder hinter diesem C-F Brennpunkt. Bemerkbar macht sich dieser Farbfehler an den bekannten violetten oder purpurnen Halohöfen um hellere Objekte. Ändert man den Fokus, so werden andere Farbbereiche unscharf abgebildet: der Farblängsfehler bleibt bestehen, wie unschwer aus der rechts abgebildeten Skizze zu entnehmen ist. Der vielgelobte d-g Achromat zeigt zwar einen kleineren blauen Halo, der grüne und der rote wachsen dafür aber wieder stärker an, was bei der visuellen Planetenbeobachtung noch störender ist. Lediglich bei Achromaten bis 110 mm Öffnung und kleineren Öffnungsverhältnissen als 1:15 kann der Farblängsfehler bei Verwendung normaler optischer Gläser zufriedenstellend korrigiert werden. Für größere Aperturen oder "schnellere" Öffnungen bedarf es zur besseren Farbkorrektur Gläser mit anormaler Farbdispersion oder extremer Brechungsindizes.



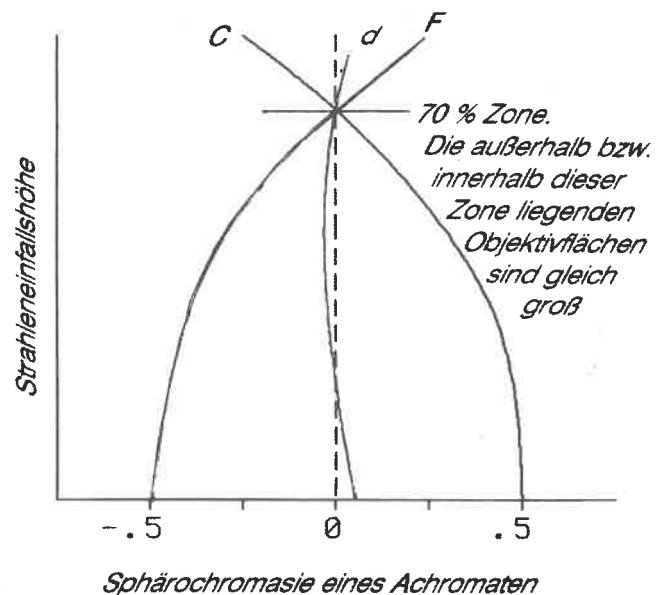
Farblängsfehler eines zweilinsigen Achromaten



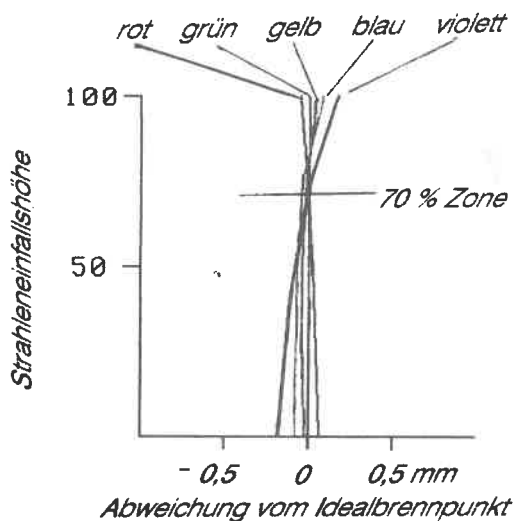
SPHÄROCHROMASIE

Dieser Fehler tritt häufig in Objektiven auf, in denen brechende Elemente (Glaslinsen) vorkommen und besonders gerne bei höher geöffneten Systemen (Öffnungsverhältnisse größer als 10). Bei 2 oder 3-linsigen Refraktorobjektiven, die mit Luftabstand montiert sind oder aber auch bei verkitteten Linsensystemen kommt dieser Fehler immer vor: er macht sich bemerkbar an z.B. überkorrigierter sphärischer Aberration im blauen Spektralbereich aber gleichzeitig unterkorrigierter sphärischer Aberration im roten Spektralbereich.

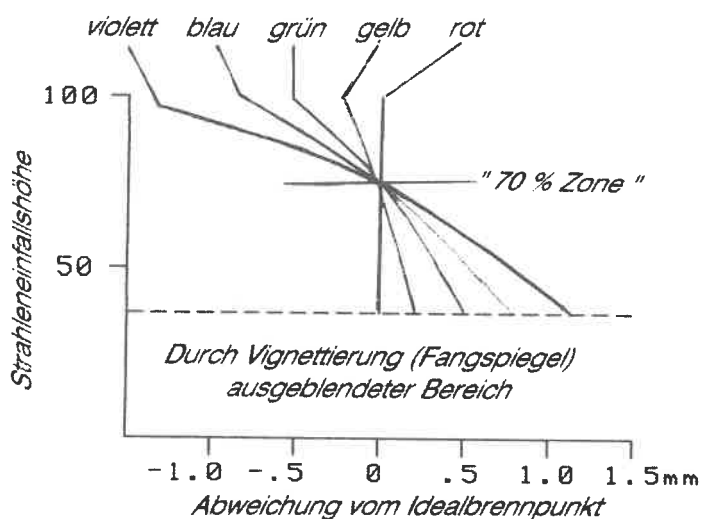
In der Regel korrigiert der Optikonstrukteur das System sphärisch optimal im gelben oder grünen Spektralbereich. An den Enden des sichtbaren Spektralbereichs treten dann



beträchtliche Beträge an Über- und Unterkorrektur auf (siehe Skizze auf der vorhergehenden Seite). Dadurch wird die noch im Sinne einer guten Korrektur vertretbare Lichtstrahleneinfallshöhe begrenzt: entweder muß bei gegebener Brennweite die Öffnung verkleinert oder umgekehrt bei gegebener Öffnung die Brennweite verlängert, das System "langsamer" gemacht werden. Der Konstrukteur kann die Sphärochromasie bei 2- oder 3-linsigen Objektiven durch die Glassortenwahl oder auch durch Abstandsänderung der Einzelelemente beeinflussen.



Sphärochromasie und sekundäres Spektrum eines 200 mm (1:15) Apochromaten mit Luftabstand (Planetary Triplet)

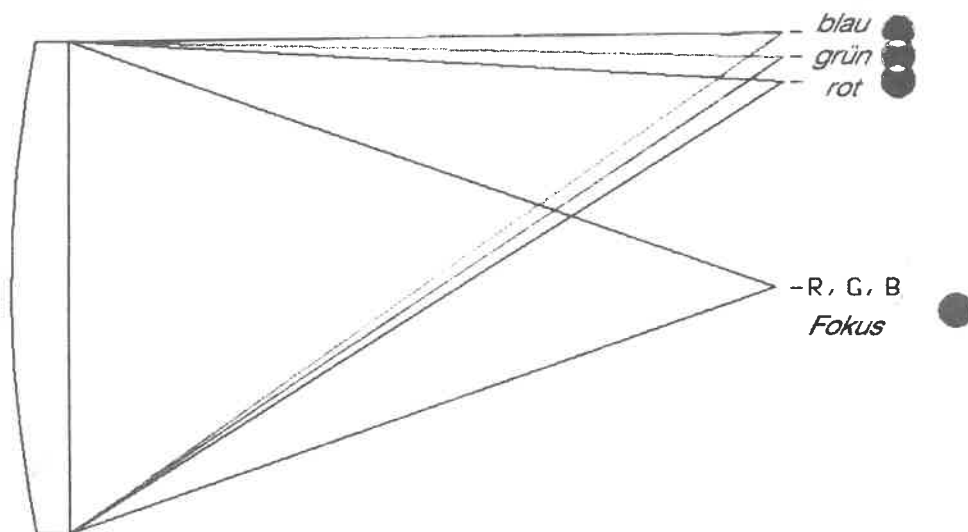


Sphärochromasie eines 200 mm (1:10) Schmidt-Cassegrain Systems, welches im roten Laserlicht korrigiert wurde

Größere Ausmaße nimmt die Sphärochromasie in Schmidt-Cassegrain oder Maksutovsystemen an: die Korrekionsplatte ist nur für eine Wellenlänge ideal sphärisch korrigiert. Diesen Farbfehler können natürlich die nachfolgenden Spiegel nicht korrigieren. Wurde das System mit Hilfe eines häufig verwendeten roten Lasers interferometrisch sphärisch korrigiert, so sind alle kürzeren Wellenlängen zunehmend überkorrigiert. Wenn auch in diesen Systemen kein Farblängsfehler auftritt, werden feinste Planetendetails durch eben diese Sphärochromasie "verschmiert" und die Kontrastwiedergabe des Systems leidet stark. Erreicht diese Sphärochromasie in 1:10 geöffneten Schmidt-Cassegrain-Systemen schon beachtliche Werte (siehe Skizzen oben) so ist ein Maksutov in noch viel höherem Maße damit behaftet und eine Öffnungsverhältnisbeschränkung ist unbedingt erforderlich.

FARBQUERFEHLER

Dieser Fehler macht sich an der Zerlegung außeraxialer Bildpunkte in ihre spektralen Bestandteile bemerkbar. Je weiter ein Stern von der Bildmitte entfernt ist, desto deutlicher ist sein Spektrum zu sehen. Bei Objektiven, die in der Astronomie verwendet werden, tritt dieser Fehler sehr selten auf, kommt aber in komplexer zusammengesetzten Systemen wie Teleobjektiven oder auch Okularen häufiger vor. Aufgabe des Optikkonstruktors ist es, von Anfang an diesen Farbquerfehler zu vermeiden; nachträglich kann er nicht mehr beseitigt werden.



LICHTDURCHLÄSSIGKEIT

Obwohl größere Aperturen naturgemäß ein höheres Lichtsammelvermögen besitzen, sind unterschiedliche optische Systeme in eben diesem Sammelvermögen recht verschieden. Hochwertiges optisches Glas absorbiert pro cm Dicke nur etwa 0,5% der einfallenden Lichtenergie; das für Schmidt-Korrektionsplatten meist benutzte BK-7 Glas absorbiert gut das Doppelte im sichtbaren Spektralbereich. Durch moderne Mehrschichtenvergütung kann die Oberflächenreflexion an Glasflächen bis auf 1% bei Kron- und 0,5% bei Flintglas verringert werden. Für Schmidt-Korrektionsplatten wird diese Mehrschichtenvergütung bis heute nicht angeboten - auch wenn die Werbeaussagen einiger Hersteller anderes behaupten. Normale Aluminiumverspiegelungen reflektieren im sichtbaren Spektralbereich etwa 90% des einfallenden Lichts, Mehrschichtenbeläge bringen es bis auf 95% Reflektivität.

Im Folgenden sei der Lichtdurchsatz eines handelsüblichen 200 mm Schmidt-Cassegrain-Teleskops mit normaler Optikoberflächenbehandlung verglichen mit einem verkitteten 3-linsigen Apochromaten, der allerdings vielschichtenvergütete Oberflächen aufweist. Durch die Verkittung der Einzelelemente werden Lichtverluste innerhalb des Objektivs minimiert, da durch den glasähnlichen Brechungskoeffizienten des Immersionsmaterials Reflexionsverluste weitgehend verhindert werden. Die Apertur des Apochromaten betrage 150 mm.

200 mm - Schmidt-Cassegrain-Teleskop:

Reflexionsverluste an der Korrektoroberfläche: (einfach vergütet, Ein- und Austrittsverluste = 2 x 5%)	-9,5 %
Absorptionsverluste einer 1 cm dicken BK-7 Korrektorplatte	-1,0 %
Abschattungsverluste bedingt durch den Fangspiegel inkl. Halterung	-12,5 %
Reflexionsverlust durch die Hauptspiegeloberfläche	-10,0 %
Reflexionsverlust durch die Fangspiegeloberfläche	-10,0 %
Gesamte durchgelassene Lichtmenge	70,5 %
Dies entspricht einer effektiven Apertur von	16,8 cm

Die Verluste im 150 mm Apochromaten belaufen sich lediglich auf etwa 2 x 0,5 % Oberflächenreflexion (multicoated) und interne Glasabsorption von 2 %. Die Gesamtlichttransmission erreicht somit Werte von 97 %. Die effektive Öffnung verkleinert sich lediglich um 2,3 mm auf **14,77 cm**.

Bedingt durch die wesentlich bessere optische Korrektur des Apochromaten wird erheblich mehr Lichtenergie in der zentralen Beugungsscheibe vereinigt als in einem Schmidt-Cassegrain-System. Bei diesem verringert zudem die zentrale Abschattung die Lichtmenge, die in die zentrale Beugungsscheibe fließt: statt etwa 84 % wie beim unsilhouettierten Apochromaten sind es hierbei nur noch 60%! Der Rest des Lichts wandert in die die Beugungsscheibe umgebenden Beugungsringe; hierbei bekommt der dritte den prozentual größten Lichtzuwachs ab. Da dieser im Durchmesser etwa das Doppelte der zentralen Beugungsscheibe aufweist, erklärt sich auch die schlechte Kontrastwiedergabe dieser Optiken. Der systembedingte zusätzliche Lichtverlust am Bildfeldrand (Vignettierung s. unter **Koma**) ist bei dieser Rechnung noch nicht berücksichtigt.

In der Praxis lassen sich - wie oft berichtet - mit Refraktoren ohne weiteres höhere Sternengrenzgrößenklassen erreichen als mit Reflektoren selbst größeren Durchmessers.

