

# Fernrohrtest am Stern – ganz einfach

---

v1.2, April 2015

Uwe Pilz, [piu58@gmx.de](mailto:piu58@gmx.de)

---

# 1 Einleitung

Erfahrung  
ist eine verstandene Wahrnehmung.  
Immanuel Kant

Der Sternetest ist die am einfachsten auszuführende Prüfmethode für astronomische Fernrohre. Er ist sehr empfindlich, Abweichungen von  $\lambda/10$  lassen sich leicht erkennen. Außerdem ist er bezüglich der optischen Unzulänglichkeiten empfindlich: Die Ursache der Abweichung vom Ideal lässt sich meist recht einfach angeben. Der Sternetest versagt, wenn mehrere Abweichungen parallel vorliegen: Die Veränderung der Beugungsfiguren ist dann komplex, der Rückschluss auf die Ursachen und ihr Ausmaß kaum noch möglich.

Das Verfahren beruht auf der Gestalt von Beugungsfiguren bei unscharf eingestelltem Instrument. Diese werden mit vorher berechneten Mustern verglichen. Dieser Vergleich macht das Verfahren halbquantitativ: Das Maß der Abweichung kann zumindest abgeschätzt werden.

Die Sternentext-„Bibel“ ist das Buch *Star Testing Astronomical Telescopes* von Harold Richard „Dick“ Suiter. Dieses Buch beleuchtet alle Aspekte des Verfahrens tiefgründig, hervorzuheben sind die hochwertigen Grafiken der Beugungsfiguren: Sie übersteigen das, was mit dem frei verfügbaren Aberrator-Programm möglich ist, da sie an die Wiedergabemöglichkeiten des Druckes in beispielhafter Weise angepasst wurden.

## 2 Defokussierung und künstliche Sterne

Der Gebildete  
treibt die Genauigkeit nicht weiter,  
als es der Natur der Sache entspricht.  
Aristoteles

Der Sternetest beruht auf Beugungsfiguren, welche unscharf eingestellte Sterne hervorrufen. Um diese Figuren mit theoretischen Ergebnissen vergleichen zu können, muss in einem genau festgelegten Maß unscharf gestellt werden. Als Maß wird hierbei die Abweichung der Wellenfront vom scharfen Bild benutzt, gerechnet in Wellenlängen. Die Auszugsveränderung  $\Delta f$  muss für das eigene Instrument berechnet werden:

$$\Delta f(1\lambda) = 0.0044 \text{ mm } F^2 \quad (1)$$

Hierbei ist  $F$  das Öffnungsverhältnis, das Ergebnis gilt für die Abweichung der Wellenfront von einer Wellenlänge. Mehrfache davon ergeben sich durch Multiplikation. Beispiel: Newton 8 Zoll f/6:

$$\begin{aligned} F &= 6 \\ \Delta f(1\lambda) &= 0.16 \text{ mm} \\ \Delta f(8\lambda) &= 8 * 0.16 \text{ mm} = 1.3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2)$$

Mit diesen Auszugsverlängerungen kann man nicht gut arbeiten, man bräuchte ja stets einen Messschieber. Deshalb rechnet man diese in Umdrehungen des Fokusknopfes um, oder in Bruchteile davon. Zuvor muss man freilich einmal mit dem Messschieber ermitteln, wieviel Fokusdifferenz einer Umdrehung entspricht.

Künstliche Sterne dürfen dem Fernrohr nicht zu nahe stehen, sonst werden zusätzliche Fehler eingeführt, v.a. sphärische Aberration. Die folgende Formel gibt die Entfernung an, bei der dieser zusätzliche Fehler beugungsbegrenzt ist, also  $\lambda/4$ . Es wird empfohlen, die so errechnete Entfernung zu verdoppeln. Wenn man diese Entfernung unterschreitet, dann zeigt der Sternetest eine Überkorrektur, bzw. eine tatsächlich vorhandene Unterkorrektur wird als zu gering ausgewiesen.

$$E = \frac{1}{0.00007 \text{ m}} * \frac{D^2}{F^2} \quad (3)$$

Die Angabe  $m^2$  im Nenner ist die Maßeinheit Quadratmeter, welche sich aus der Formel ergibt – die Apertur  $D$  muss also in Metern eingegeben werden.

Beispiel: 8 Zoll,  $f/6$ :  $D = 0.2\text{ m}$ ,  $F = 6$  :  $E = 16\text{ m}$ . Empfohlen wird das Doppelte, also 32 Meter. Bei kleinen Instrumenten ist zusätzlich zu beachten: Die Entfernung sollte wenigstens der 20-fachen Teleskopbrennweite entsprechen, ansonsten wird die Auszugsverlängerung groß.

Aus dem Auflösungsvermögen des Teleskops und der Mindestentfernung des künstlichen Sternes ergibt sich eine maximale Sterngröße  $d$ : Größere Sterne erscheinen fokussiert nicht mehr punktförmig:

$$d = 0.7 \mu\text{m } E/D \tag{4}$$

Beispiel: Entfernung 32 Meter, Öffnung 0.2 Meter:  $d \sim 100 \mu\text{m}$ .

Es ist schwierig, künstliche Sterne mit weniger als  $100 \mu\text{m}$  Durchmesser herzustellen. Eine einfache Methode besteht darin, glänzende Kugeln in die Sonne zu hängen. Solche Kugeln geben ein stark verkleinertes Abbild der Sonne, und zwar umso stärker verkleinert, je kleiner die Kugel ist: Eine Kugel gibt ein Sonnenbild von etwa  $1/300$  des Kugeldurchmesser. Eine große Weihnachtsbaumkugel von 8 Zentimetern gibt also  $270 \mu\text{m}$ , eine kleine 25-mm-Kugel gibt etwa  $80 \mu\text{m}$ , eine Kugellagerkugel von einem Zentimeter  $30 \mu\text{m}$ . Allzu kleine Kugeln geben ein lichtschwaches Abbild, deshalb sollte man auch nicht unnötig kleine Kugeln benutzen. Sehr große Instrumente erfordern große Mindestabstände von mehreren Hundert Metern. Dann ist auch die minimale Kugelgröße erheblich. Hier können Weitwinkelspiegel aus dem Kfz-Bedarf eingesetzt werden: Das ist zwar nur ein Teil einer Kugel, aber das genügt (Tipp von Rick Suiter). Statt von der Sonne kann die Kugel auch mit einer auf 1 Zentimeter abgeblendeten Taschenlampe beleuchtet werden, die 1 Meter entfernt ist.

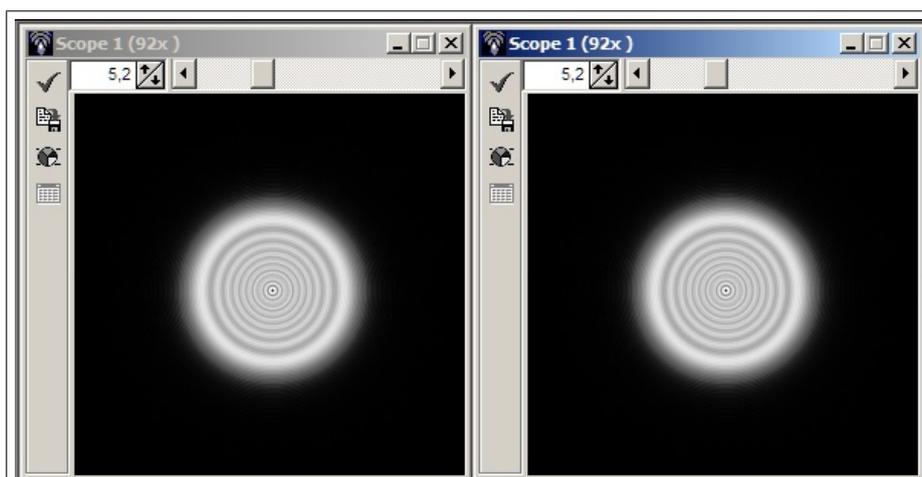
### 3 Beurteilung der Beugungsbilder – ein erster Blick

Auch eine Enttäuschung,  
wenn sie nur gründlich und endgültig ist,  
bedeutet einen Schritt vorwärts.

Max Planck

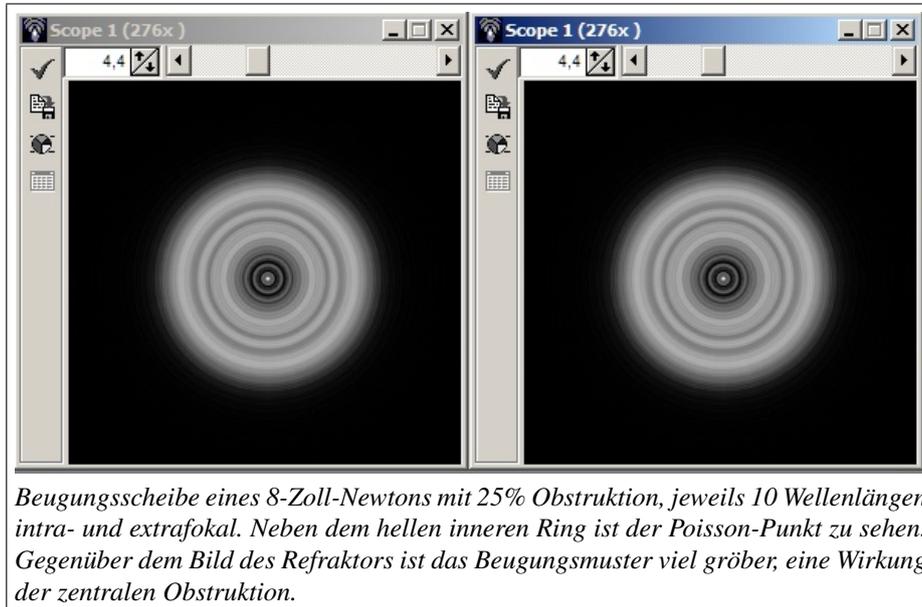
Zur Beurteilung des Fernrohrs wird das Beugungsbild eines unscharf eingestellten Sterns beurteilt. Die zweckmäßige Defokussierung beträgt  $8 \dots 12$  Wellenlängen. Es wird ein Okular benutzt, welches ca. 1 mm Austrittspupille ergibt (Okularbrennweite entspricht in etwa dem Öffnungsverhältnis). Der Stern sollte im Zentrum des Bildes stehen.

Ein perfektes Instrument ohne zentrale Obstruktion zeigt ein auf den ersten Blick exakt rundes, gleichmäßig helles Beugungsscheibchen, welches an der äußeren Begrenzung einen dunklen und einen hellen Ring zeigt. Beim genauen Hinsehen besteht der gleichmäßig helle Teil aus einigen Ringen:



*Beugungsscheibe an einem farbreinen 8-cm-Refraktor ohne Bildfehler, jeweils 10 Wellenlängen intra- und extrafokal. Die Bilder wurden mit dem Programm Aberrator 3.0 erstellt.*

Ein perfektes Instrument mit einer zentralen Obstruktion zeigt im Inneren eine dunklen Scheibe – das Bild der Obstruktion. Angrenzend ist ein zusätzlicher, heller Ring. Bei genauem Hinsehen kann der sogenannte Poisson-Fleck gesehen werden, ein heller Lichtpunkt im Inneren des Schattens.



## 4 Beurteilung von Fehlern

Fehler gehören zu den Verpflichtungen, mit denen man für ein vollwertiges Leben bezahlt.

Sophia Loren.

Für die Beurteilung der Art und des Ausmaßes von Fehlern werden die beobachteten Beugungsbilder mit berechneten Resultaten verglichen. Man kann die theoretischen Bilder mit dem Programm Aberrator selbst berechnen oder dem Buch „Star testing optical telescopes“ entnehmen. Die Abbildungen im Suiter-Buch sind besser, da sie mehr Effekte berücksichtigen (z.B. Oberflächenrauigkeit). Allerdings lässt sich das Programm Aberrator ganz genau auf die eigene Optik einstellen. Zum Suiter-Buch gibt es das dort benutzte Rechenprogramm als Begleitmaterial zu kaufen, ich besitze es jedoch nicht.

Das Verfahren des Bildvergleichs arbeitet gut, Fehler bis hinunter zu  $\lambda/10$  können gut beurteilt werden. Schwierig ist es jedoch, mehrere gleichzeitig vorhandene Fehler zu beurteilen. Die chromatischen Aberrationen können mit dem Sterntest überhaupt nicht eingeschätzt werden. Es ist am besten, bei „farbbehafteten“ Systemen einen strengen Grünfilter zu benutzen, damit die Beugungsbilder nicht verschmiert werden. Die Luftunruhe ist nicht statisch und kann in ihrem Ausmaß (also ob innerhalb der Beugungsgrenze oder nicht) ebenfalls nicht beurteilt werden.

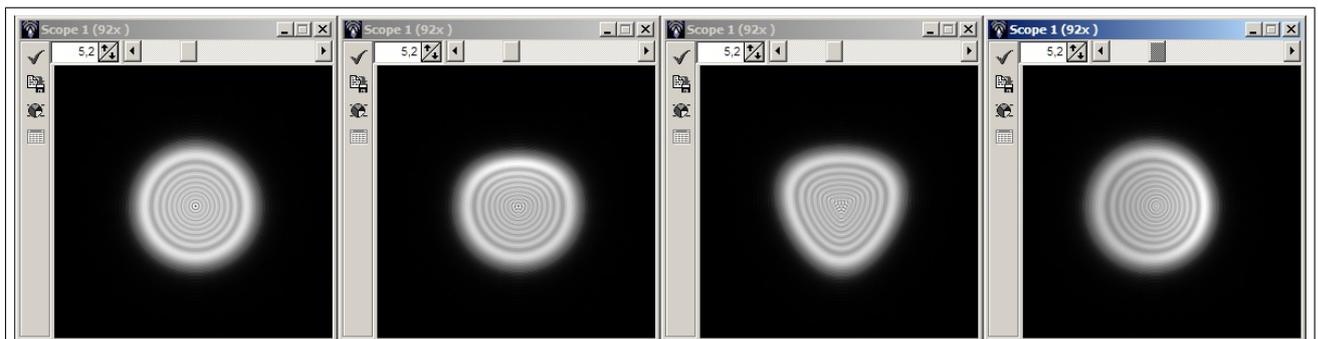
Luftunruhe prinzipiell erkennt man an einem sehr weit unscharf eingestellten Stern, so dass eine wirklich große helle Scheibe entsteht (deutlich mehr als 10 Wellenlängen). Die Luftschlieren sieht man dann als bewegliche helle und dunkle Bänder, das ist sehr auffällig. Bei normaler Einstellung im Bereich um 10 Wellenlängen sehen die Beugungsbilder zackelig, zerfranst aus, die Form ändert sich ständig.



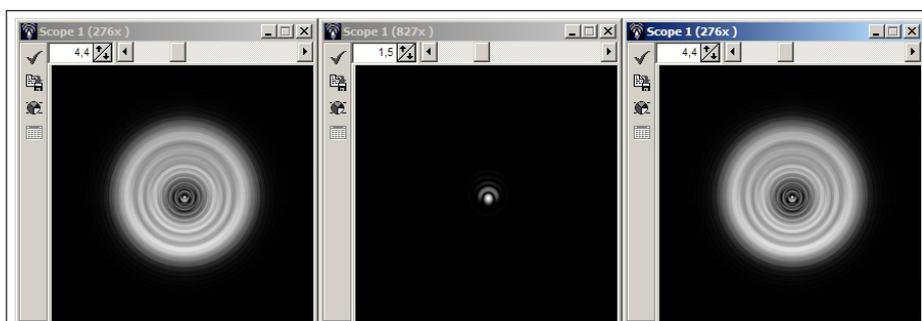
*Effekt der Luftunruhe an einem 8-cm-Refraktor.*

Bei der Fehleranalyse empfehle ich, zuerst nach den behebbaren Fehlern zu suchen. Diese sind zu beseitigen, damit die Fabrikationsfehler isoliert und deutlich hervortreten. Behebbar sind:

- Warmluftkeil im Tubus
- verspannte Optik
- dezentrierte Optik
- verkippte Optik



*Perfektes Bild, Warmluftkeil, verspannte Optik, dezentrierte Optik an einem 8-cm-Refraktor.*

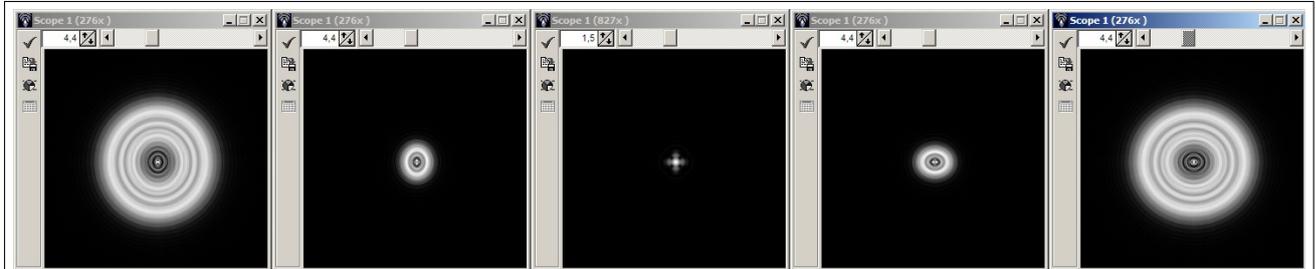


*Verkippte Optik, 8-Zoll-Newton, Fehler (Koma)  $\lambda/2$ . Die beiden äußeren Bilder sind um 10 Wellenlängen defokussiert (intra- und extrafokal), das mittlere Bild ist im Fokus. Das Fokusbild ist 3-fach vergrößert.*

Diese Fehler lassen sich bei den meisten Instrumenten selbst abstellen. Erst nach deren Behebung sollte man die fertigungsbedingten Fehler i.e.S. suchen:

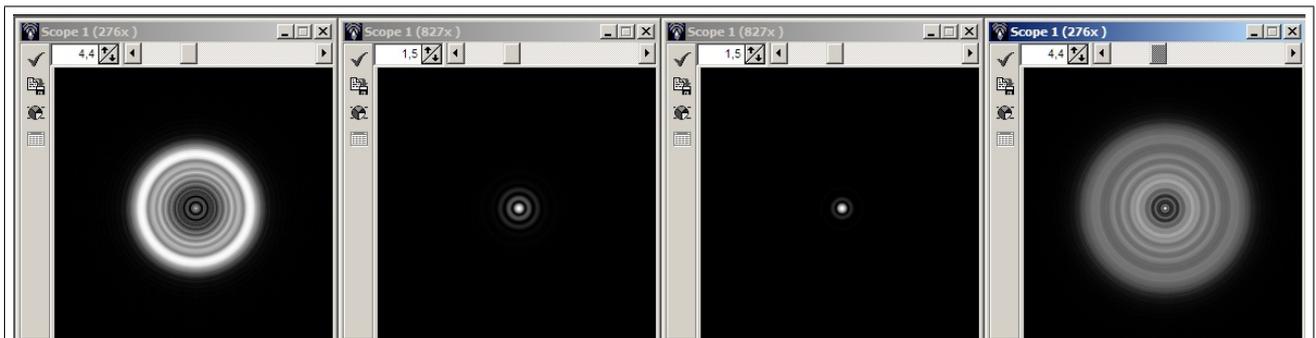
- Astigmatismus

- sphärische Aberration
- Zonen und abgefallene Kante



*Astigmatismus: Optik, 8-Zoll-Newton, Fehler  $\lambda/2$ : 10 und 3 Wellenlängen intra- und extrafokal sowie im Fokus. Das Fokusbild ist 3-fach vergrößert. Astigmatismus ist leicht identifizierbar, wobei er bei geringer Defokussierung besser sichtbar wird. Die Ursache ist jedoch meist schwer zu ermitteln.*

Die sphärische Aberration lässt sich schwieriger erkennen, da die Bilder kreisrund bleiben. Charakteristisch ist, dass intrafokal eine scharfe Bildbegrenzung vorhanden ist, während extrafokal das Bild ausfrant. Das genaue Ausmaß der Aberration lässt sich ermitteln, in dem man die Bilder mit den Simulationsergebnissen vergleicht. Wenn man die Defokussierung korrekt einstellt, dann lässt sich jeder einzelne Ring in der Beugungsscheibe finden.



*Sphärische Aberration, Unterkorrektur: Optik, 8-Zoll-Newton, Fehler  $\lambda/2$ : 10 Wellenlängen intrafokal, im Fokus, aber ohne Aberration, 10 Wellenlängen extrafokal. Die Fokusbilder sind 3-fach vergrößert.*

Zonenfehler und abgesunkene Kanten äußern sich darin, dass die Ringe innerhalb der Beugungsscheibe nicht gleichmäßig sind, sondern sich helle und dunkle Bereiche abwechseln. Dies lässt sich mit dem Programm Aberrator nicht berechnen. In „Star testing optical telescopes“ sind Beispiele gegeben. Eine abgesunkene Kante kann entdeckt werden, in dem man den äußeren Bereich des Spiegels abdeckt und den Test wiederholt.

## 5 Das Program Aberrator

Ein Mensch, der sich ein Schnitzel brät,  
bemerkt, dass dieses ihm missrät.  
Doch da er es sich selbst gebraten,  
tut er, als sei es ihm geraten.

Eugen Roth

Um das Ausmaß von optischen Unzulänglichkeiten möglichst genau angeben zu können, müssen die beobachteten Beugungsfiguren mit berechneten verglichen werden. Abweichungen werden in Bruchteilen der Wellenlänge des grünen Lichts gegeben; die Genauigkeit dieser Angabe hängt davon ab, welche feine Unterschiede zwischen beobachteten und berechneten Figuren erkennbar sind. Für die meisten Abweichungen ist  $\lambda/10$  deutlich bemerkbar.

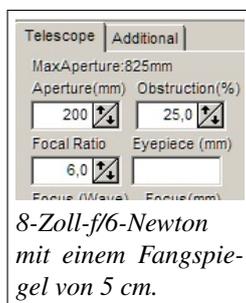
Sowohl im *Suiter* als auch hier im Text werden Figuren angegeben, welche für typische Amateurinstrumente gelten. Sie sind meist nicht völlig identisch mit den zu erwartenden Bildern am eigenen Instrument: Die Bilder ändern sich deutlich, falls sich Öffnung oder zentrale Obstruktion ändern. Sie sind aber recht unempfindlich gegenüber verschiedenem Öffnungsverhältnis.

Selbstberechnete Bilder bieten die Möglichkeit, den am eigenen Instrument erkannten Fehler mit der höchstmöglichen Präzision nachzustellen – damit lässt sich das Ausmaß des Fehlers am besten abschätzen. Das hierfür geeignete Programm *Aberrator* ist frei verfügbar und kann unter [aberrator.astronomy.net](http://aberrator.astronomy.net) heruntergeladen werden. Eine Installation ist nicht nötig, das Programm kann nach dem Auspacken einfach gestartet werden.

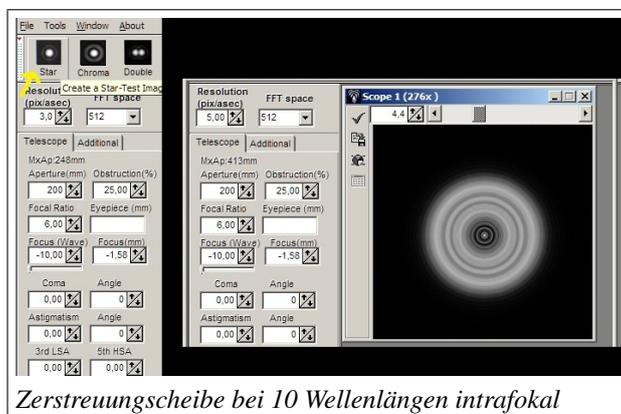
Es empfiehlt sich, zuerst die Funktion „Monitor Calibrate“ aufzurufen. Auf der linken Seite des Bildschirms werden danach alle Parameter des zu untersuchenden Fernrohres eingegeben. Leider gestattet es *Aberrator* nicht, Instrumente dauerhaft abzuspeichern. Man kann zwar mehrere Instrumente eingeben, dies gilt aber immer nur für eine Sitzung.

*Aberrator* hat eine seltsame Eigenschaft: Wenn man Zahlenwerte von der Tastatur eingibt, dann bleibt immer eine 0 hinten dran stehen. Wenn beispielsweise versucht wird, 200 mm Öffnung einzugeben, dann steht 2000 da. Am besten gewöhnt man sich an, jede Zahl mit einem Dezimalzeichen abzuschließen, das klappt immer.

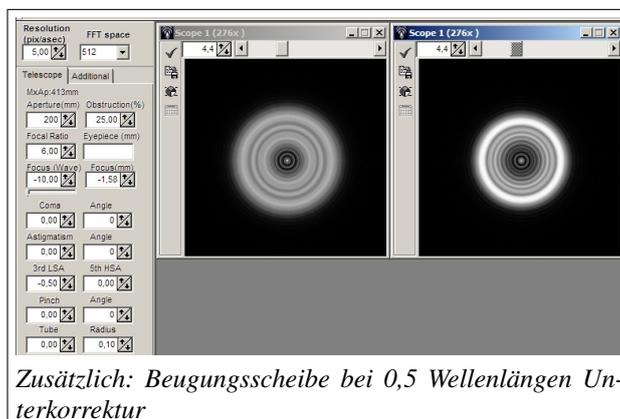
Zuerst muss also das Instrument eingestellt werden. Dies geschieht im oberen Teil des Menüs: Lediglich Öffnung, Obstruktion und Öffnungsverhältnis werden benötigt, der Typ des Instrumentes ist für die Berechnung unwichtig.



Als nächstes wird das Maß der Defokussierung eingestellt. Diese muss mit der tatsächlichen Defokussierung übereinstimmen. Angegeben werden Wellenlängen, das Programm rechnet dazu die Auszugsverschiebung aus. Werte innerhalb des Fokus sind negativ, außerhalb positiv. Es muss noch die Größe der Beugungsscheibe in Pixeln eingestellt werden. Hierzu dient das Feld „Resolution (pix/arcsec)“. Leider ist der Verstellbereich für die Anwendung zum Sterntest zu gering – unterhalb des Wertes 5 kann man den Pfeiltasten nicht gehen. Es ist jedoch möglich, einen kleineren Wert per Hand einzustellen. Der Wert muss um so kleiner sein, je kleiner das Instrument ist. Für den im Beispiel dargestellten 8-Zoll-Newton ist 3.0 günstig. Nach dem Druck auf das Sternsymbol links oben (nur dieses braucht man für den Sterntest) steht die Resolution wieder auf 5! Vor dem nächsten Bild muss dies wieder per Hand eingetragen werden.



Zum Vergleich kann jetzt ein Bild danebengelegt werden, welches einen optischen Fehler zeigt. Im Beispiel wurden 0,5 Wellenlängen sphärische Unterkorrektur (negative Werte) eingetragen.



Man kann sich auf diese Weise Serien von Zerstreungsscheiben mit zunehmendem Fehler für die eigenen Instrumente anfertigen und als Bildschirmabdruck aufbewahren und Ausdrücke davon am Teleskop benutzen. Bei richtiger Einstellung muss jeder feine Ring in der Beugungsscheibe am Teleskop identifizierbar sein. Dies ist dann wichtig, wenn schwer unterscheidbare Fehler wie sphärische Aberration gegen abgesunkener Kante beurteilt werden müssen.

## 6 Berechnung abgesunkener Kanten

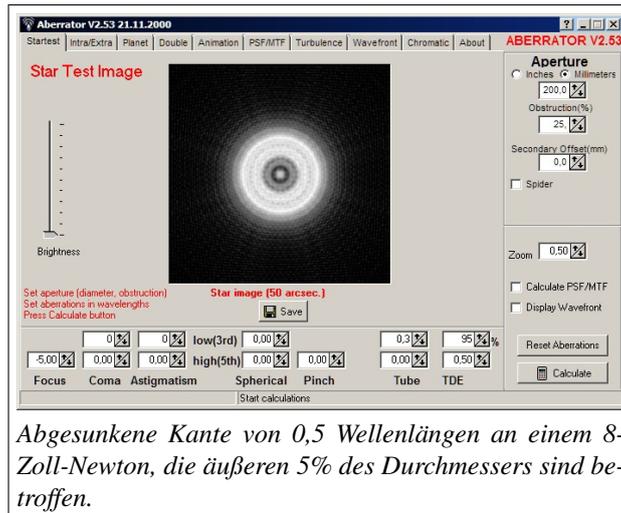
Habe keine Angst vor der Vollkommenheit.  
Du wirst sie nie erreichen.

Salvatore Dalí

Das Programm Aberrator v3.0 lässt die Berechnung abgesunkener Kanten nicht zu. Die Vorgängerversion 2.53 war dazu in der Lage. Sie kann unter [aberrator.astronomy.net/html/latest.html](http://aberrator.astronomy.net/html/latest.html) heruntergeladen werden.

Dieser Version fehlt die Möglichkeit, weit defokussierte Bilder so zu berechnen, dass sie in das Bildformat passen: Man kann lediglich den Zoom-Regler ein wenig anpassen. Man muss dann mit einem geringeren Ausmaß an Defokussierung arbeiten – was schlecht ist: Abgesunkene Kanten sieht man am besten bei starker Defokussierung von etwa 20 Wellenlängen. Sie setzen sich dann in der Beugungsscheibe gegen eine eventuell vorhandene sphärische (Rest-)Aberration durch, oft hat man ja beide Fehler.

Die abgesunkene Kante wird in Wellenlängen angegeben. Bei einer betroffenen Radius von 5% (95% in der Dialogbox) ist eine Kante von 0,63 Wellenlängen gerade noch im tolerablen Bereich, also an der Beugungsgrenze. Angesunkene Kanten verschlechtern den Kontrast niedrig vergrößerter Bilder und fallen bei hohen Vergrößerungen stellarer Objekte nicht auf. Das kann man sich so klarmachen: Überlagert werden die Bilder zweier Optiken, einer mit 95% Apertur, und einer mit 100% Apertur, aber einer 95%igen Obstruktion und einer anderen Brennweite. Das Bild der „äußeren“ Optik ist so weit defokussiert, dass es einen scharfgestellten Stern nur wenig beeinflusst. Allerdings wird allem ein unscharfes Bild der äußeren Teiloptik überlagert, was kontrastmindernd wirkt.



Abgesunkene Kante von 0,5 Wellenlängen an einem 8-Zoll-Newton, die äußeren 5% des Durchmessers sind betroffen.

## 7 Beurteilung des Farbfehlers

Die Menschen drängen sich zum Lichte,  
nicht um besser zu sehen,  
sondern um besser zu glänzen.

Friedrich Nietzsche

Die Einschätzung des Farbfehlers wird weder vom Programm *Aberrator* noch vom *Suiter* in nachvollziehbarer Weise behandelt. Mit Hilfe des Sterntests kann auf einfache Weise der RC-Index ermittelt werden, welcher von Lichtenknecker für die Beurteilung der Restchromasie von Refraktoren eingeführt wurde. Es stellt den Farbblänsfehler in Beziehung zur Schärfentiefe. Nur wenn dieser Farbfehler in der Größenordnung der Schärfentiefe bleibt, handelt es sich um eine ausgezeichnete Optik. Diese Definition ist einige Jahrzehnte alt, heute sind die Anforderungen höher: Bei einem echten Apochromaten sollte der Farbfehler in der Schärfentiefe verschwinden, was bedeutet, dass der RC-Wert  $<1$  sein muss.

RC-Wert	Abbildung
0 ... 3	hervorragend
3 ... 6	sehr gut
6 ... 12	gut
12 ... 20	brauchbar

Ausgangspunkt für den RC-Wert ist die Fokusslage für verschiedene Wellenlängen. Für deren Messung können die Farbfilter benutzt werden, welche zur Planetenbeobachtung dienen.

Die Messung der Fokusslage muss auf wenige Mikrometer genau erfolgen. Dazu ermittelt man, wieviel Auszugsverlängerung eine Umdrehung des Fokusrades bewirkt. Über den Umfang dieses Rades kann man dann kleine Auszugsveränderungen als Bewegung auf dem Umfang, gemessen in Millimetern, angeben. Bei Auszügen mit Untersetzung kann die Fokusslage mit einem Fehler von wenigen Mikrometern bestimmen.

Zur Messung geht man so vor, dass das Teleskop zunächst auf grünes Licht fokussiert wird. Der grüne Farbfilter muss dazu entweder vor der Lampe angebracht werden, welche die Kugel beleuchtet, oder oben auf das Okular gelegt werden. Nicht einschrauben! Eingeschraubte Filter verlagern den Fokus, und es ist nicht sicher, ob diese Änderung bei allen Filtern gleich ist.

Diese Fokusslage wird markiert. Man kann auf dem Fokussierad ein Stück Klebeetikett anbringen und die Fokusslage gegen eine Marke am Instrument mit einem Bleistiftstrich festhalten. Anschließend wechselt man den Farbfilter und ermittelt mit einem Lineal, um wie viele Millimeter das Fokusrad gedreht werden musste. Dies wird in Mikrometer Fokusslage umgerechnet. Außen liegende Werte sind positiv, von grün aus gesehen innen liegende negativ. In die Berechnung gehen die Werte für rot und blau ein.

Zunächst ermittelt man die Schärfentiefe  $T$  für grünes Licht:

$$T = 1,09\mu m F^2, \quad (5)$$

wobei  $F$  die Öffnungszahl ist. Beispiel: Ein  $f/6$ -Instrument (also  $F = 6$ ) hat knapp  $40 \mu m$  Schärfentiefe.

Der RC-Rindex  $C_R$  ist dann

$$C_R = \frac{|f_B| + |f_R|}{2T} \quad (6)$$

$f_B$  und  $f_R$  sind die Fokusdifferenzen für blaues und rotes Licht. Beispiel: Ein  $F/6$ -Instrument mit  $f_B = -29\mu m$  und  $f_R = 84\mu m$  hat einen RC-Index von 1,4.

## 8 Formelzeichen (auch diejenigen des Arbeitsblattes)

Was immer ein endliches Wesen begreift,  
ist endlich.

Thomas von Aquin

$b_1$	Bogen am Fokusrad für $1 \lambda$
$C_R$	RC-Index
$\Delta f_u$	Auszugsveränderung für eine Umdrehung des Fokusrades
$\Delta f_1$	Fokusveränderung für eine Wellenlänge grünen Lichtes
$\Delta f$	Fokusdifferenz für rotes Licht
$d$	maximaler Durchmesser des künstlichen Sternes
$D$	Apertur des Teleskops
$E$	Entfernung des künstlichen Sterns
$f$	Brennweite; Bildweite
$f_B$	Fokusdifferenz für blaues Licht
$f_G$	Fokusdifferenz für gelbes Licht
$f_R$	Fokusdifferenz für rotes Licht
$f_V$	Fokusdifferenz für violetteres Licht
$F$	Öffnungszahl; $F=f/D$
$g$	Durchmesser des Fokusrades
$\lambda$	Lichtwellenlänge
$k$	Durchmesser einer Kugel, die als künstlicher Stern dient
$T$	Schärfentiefe
$u$	Umdrehungen des Fokusrades
$w_1$	Winkeländerung am Fokusrad für $1 \lambda$