

Peak-to-Valley, RMS of Strehlratio ter bepaling van de kwaliteit van een telescoopspiegel?

(door: Jan van Gastel)

Om scherpe, detailrijke beelden te krijgen bij het kijken door een telescoop, ook bij hoge vergroting, is optiek nodig van goede kwaliteit. Er zijn heel wat manieren om de kwaliteit van bijvoorbeeld een telescoopspiegel te bepalen (zie literatuur 1 voor een overzicht). Handig is daarbij om de kwaliteit in één getal te kunnen uitdrukken. Veel gebruikte maten zijn de 'Peak-to Valley' fout, de 'Root-Mean-Square' fout en de Strehlratio¹. Welke van deze drie vorm(t)en nu eigenlijk de beste kwaliteitsindicatie²? Eigenlijk is de discussie hierover al lang beslecht in het voordeel van RMS en met name Strehlratio, maar op de een of andere manier blijven veel amateurastronomen telescoopspiegels beoordelen op de Peak-to-Valley (P-V) fout. Helaas blijven veel spiegelmakers daaraan meewerken door reclame te maken met hun P-V waarden. Steeds weer lees je over spiegels van $1/4 \lambda$ versus $1/8 \lambda$ om een voorbeeld te noemen, daarmee doelend op de P-V wavefront³ fout. Terwijl dit gegeven voor de prestatie van de spiegel weinig of niets zegt⁴. Wat ik hieronder hoop duidelijk te maken.

Definities

De Peak-to-Valley (P-V) fout is het verschil – anders gezegd: de afstand in golflengten – tussen de hoogste piek en het diepste dal van de spiegel. De P-V fout is eenvoudig te meten en is dé maat die wordt gebruikt bij het uitvoeren van een Foucaulttest, de meest gebruikte test bij het maken van spiegels voordat de interferometer zijn intrede deed⁵.

De Root-Mean-Square (RMS) fout is een afwijking die betrekking heeft op de totale spiegel (alle meetpunten) en niet op slechts twee punten. Hij wordt als volgt berekend:

- bereken de gemiddelde wavefrontafwijking (ten opzichte van het 'ideale' wavefront) van alle meetpunten;
- trek van alle metingen dat gemiddelde af en kwadrateer de uitkomsten;
- tel al deze kwadraten op en deel de uitkomst door het aantal metingen min 1;
- trek de wortel uit de uitkomst en je hebt de RMS.

Uitgedrukt in een formule: $rms = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x_m)^2}{(n-1)}}$, waarin x_i = elke afzonderlijke meting, x_m = het gemiddelde van alle metingen en n = het aantal meetpunten.

Als minimum kwaliteitsniveau, geldt een rms wavefrontfout van $0.074 (1/13.5) \lambda$. Topspiegels hebben een rms wavefrontfout van $0.037 (1/27) \lambda$ of minder.

¹ Zie voor uitvoerige bespreking van de theorie met name literatuur 2, 3, 4 en 9.

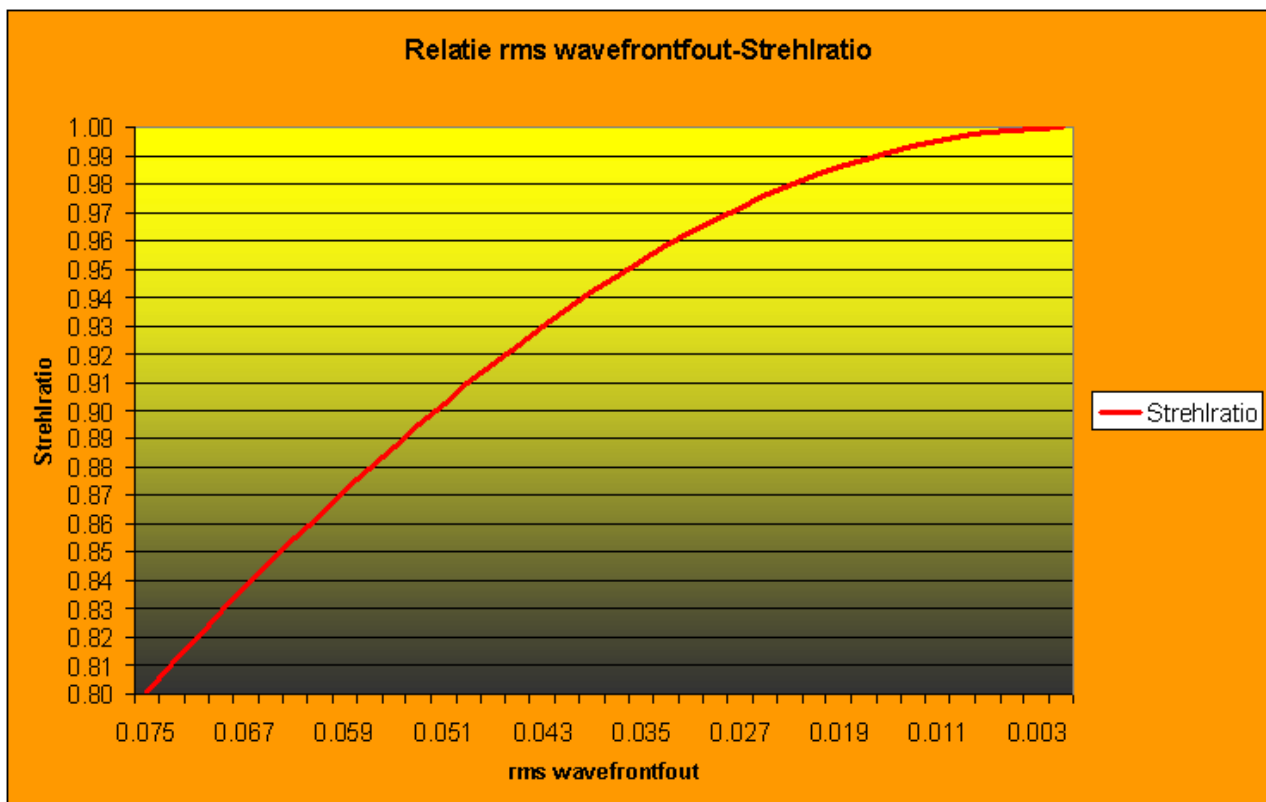
² We richten ons hier alleen op de vorm van de optiek en laten de gladheid/ruwheid van het oppervlak, hoewel belangrijk, hier buiten beschouwing.

³ We hebben het hier steeds over wavefrontfouten. Deze is voor hoofdspiegels – omdat het licht eerst naar de hoofdspiegel toe en dan weer terug gaat - twee maal zo groot is als de oppervlaktefout. Een $1/8 \lambda$ oppervlaktefout geeft dus een wavefront fout van $1/4 \lambda$. Bij een lens, waar het licht doorheen gaat en niet terugkaatst, geldt dit rekensommetje dus niet.

⁴ Hoogstens – om de woorden van Sacek (literatuur 2) te gebruiken – geeft het een soort van 'worse case' scenario. Een qua oppervlaktevorm 'worse case' $1/10 \lambda$ P-V spiegel zal beter presteren dan een 'worse case' $1/4 \lambda$ P-V spiegel. Op die manier geeft de P-V fout dus een soort van 'ondergrens' aan, die zegt dat de betreffende spiegel niet slechter zal presteren dan een spiegel met de genoemde P-V fout aan -uitsluitend - sferische aberratie. Deze manier van kwaliteitsaanduiding wordt soms gebruikt door spiegelmakers die uitsluitend testen met de Foucaulttest. De P-V, rms en Strehlratio's die uit deze test komen, zijn namelijk gewoonlijk aan de hoge kant, zo blijkt uit interferometrische tests. Vooral de P-V waarden zijn vaak onrealistisch hoog (zie voorbeeld 20 cm spiegel achter aan dit artikel). Daarmee is overigens absoluut *niet* gezegd dat met behulp de Foucaulttest geen uitstekende spiegels kunnen worden gemaakt.

⁵ Tijdens het *maken* (lees: paraboliseren) van de spiegel wordt nog steeds vaak de Foucaulttest gebruikt, maar als *eindtest* wordt steeds vaker de interferometer gebruikt, die als voordeel heeft dat hij een groot aantal meetpunten over het hele oppervlak analyseert en niet slechts een beperkt aantal meetpunten, zoals de Foucaulttest.

De Strehlratio geeft aan welk percentage van het van de spiegel komende licht dat ideaal gesproken in airydisk⁶ terecht zou moeten komen, daar ook werkelijk in terecht komt. Ideaal gesproken kan – in een telescoop zonder obstructie – 84% van al het licht in de airydisk terecht komen, de rest gaat naar de buigingsringen daaromheen. Bij fouten in de optiek en in geval van een obstructie⁷ wordt licht vanuit de airydisk naar de buigingsringen gebracht. Een Strehlratio van 0.90 voor een telescoop zonder obstructie betekent dus dat $0.90 \cdot 84\% = 75.6\%$ van het teruggekaatste licht in de airydisk komt. Een Strehlratio van 0.80 voor de optiek wordt gezien als de absolute kwaliteitsondergrens⁸. Vanaf een Strehlratio van ongeveer 0.90 heb je een goede spiegel en topspiegels hebben een Strehlratio van 0.95 (in zichtbaar licht) of beter. De Strehlratio kan uit de RMS wavefrontfout worden berekend met de formule (Mahajan of ‘extended Maréchal approximation’)⁹: $\text{Strehlratio} = 1/e^{(2 \cdot \pi \cdot \text{rms})^2}$. Van Strehlratio naar rms gaat met het omgekeerde van die formule $\text{rms} = \sqrt{-\ln(S)/(2 \cdot \pi)}$, waarin S de Strehlratio is.



Grafiek 1: Relatie rms-wavefrontfout – Strehlratio

RMS berekenen uit P-V?

Soms zie je wel dat de RMS-fout (en daarmee dan indirect ook de Strehlratio) uit de P-V fout wordt berekend. Er wordt dan vanuit gegaan, dat de RMS waarde ongeveer de $1/3.5$ maal de

⁶ De centrale, heldere piek van het airypatroon met buigingsringen.

⁷ Zie over het effect van de obstructie het artikel: 'De Telescoop, de Strehlratio en de Obstructie', te downloaden van [hier](#). Ook bij slechte seeing, slechte collimatie, lichaamswarmte die door het beeldveld gaat e.d. Wordt energie uit de airydisk gehaald.

⁸ Als er meer dan een optisch element in de telescoop aanwezig is, moeten die allemaal in die 0.8 zijn meegenomen. Een hoofdspiegel met Strehlratio 0.8 gecombineerd met een slechte vangspiegel, komt in totaal beneden die 0.80 uit.

⁹ Nauwkeurig vanaf een Strehlratio van ongeveer 0.45 (literatuur 15). Zie ook literatuur 3 voor meer uitleg. Een andere formule is: $\text{Strehlratio} = 1 - 4 \cdot \pi^2 \cdot \text{rms}^2$. Deze formule levert iets lagere Strehlratio's bij minder goede spiegels. Zie voor de afleiding van deze formule literatuur 7.

P-V-fout is. Omdat je met de P-V alleen iets weet van het hoogste en laagste punt en niets van de rest van het spiegeloppervlak, is gaat die vlieger niet op¹⁰. Zie als voorbeeld het testrapport (literatuur 12) van een spiegel met een P-V wavefrontfout van $1/6 \lambda$ en een Strehlratio van 0.97. Zou de formule in dit geval opgaan, dan zou de rms-wavefrontfout $1/6 * 1/3.5 = 0.0476 (1/21) \lambda$ zijn en de daarmee berekende Strehlratio 0.91. Een flinke onderschatting van de werkelijke kwaliteit van de spiegel dus. Een ander voorbeeld is de test van een spiegel van de bekende spiegelmaker Zambuto (literatuur 13). Met een P-V wavefrontfout van $1/8.6 \lambda$, zou de rms-wavefrontfout volgens deze formule $1/3.5 * 1/8.6 = 0.0332 (1/30) \lambda$ zijn en de daarop berekende Strehlratio 0.957. De Strehlratio is echter volgens de interferometertest 0.991 en de rms-wavefrontfout 0.015 (1/66) λ . De p-v/rms ratio is in dit geval dus geen 1/3.5 maar 1/7.67. Ook in dit geval zou deze formule dus een flinke onderschatting hebben gegeven van de Strehlratio. Het zijn dus de rms-fout en de Strehlratio die ook hier de kwaliteit bepalen en niet de P-V fout.

Waarom is de P-V-fout niet geschikt als maat voor de prestatie van een spiegel?

Zoals hierboven al vermeld, meet de P-V fout alleen het verschil tussen twee punten, het hoogste en het laagste punt. Het deel van het spiegeloppervlak met de betreffende P-V fout kan qua oppervlakte echter zeer klein zijn ten opzichte van het totale spiegeloppervlak (en het daardoor gevormde wavefront) en daardoor *geen merkbare invloed* hebben op de prestatie van de spiegel. Neem als voorbeeld twee spiegels. Spiegel A heeft een qua oppervlak heel klein P-V foutje van $1/4 \lambda$ en verder het oppervlak van een perfecte spiegel, spiegel B is in zijn totaliteit voor $1/4 \lambda$ ondergecorrigeerd is. Of spiegel B heeft – naast een vergelijkbaar $1/4 \lambda$ foutje als spiegel A – een oppervlak als in het tweede tekeningetje hieronder.



Beide spiegels krijgen in beide gevallen dezelfde P-V rating, terwijl spiegel A veel beter zal presteren dan spiegel B. Zelfs als dat kleine foutje van spiegel A $1/2 \lambda$ groot is, zal deze spiegel nog steeds beter presteren dan spiegel B. En dat terwijl ‘ $1/2 \lambda$ ’ suggereert dat het om een slechte spiegel gaat. Zie ter illustratie ook het artikel van Jim Burrows (literatuur 10) en de twee voorbeelden van Stephen Koehler¹¹, die in beide voorbeelden vijf (gesimuleerde) spiegels vergelijkt. In zijn eerste voorbeeld¹² hebben alle vijf de spiegels dezelfde RMS-waarde (0.08 λ), maar een verschillende P-V rating, lopend van 0.39 tot 1.2 λ . In zijn tweede voorbeeld¹³ hebben alle vijf de spiegels een P-V waarde van 1.0 λ en RMS-waarden lopend van 0.08 tot 0.20 λ . In het eerste voorbeeld is weinig of geen verschil te zien tussen de simulaties en MTF functies, in het tweede voorbeeld zijn de verschillen groot en zeer duidelijk zichtbaar, aantonend, dat het de RMS-fout is die de kwaliteit en de prestatie bepaalt en niet de P-V fout.

Natuurlijk is een spiegel die een P-V-waarde heeft van $1/10 \lambda$ een goede spiegel¹⁴, want op alle punten anders dan de afstand tussen de hoogste piek en het diepste dal, zal de spiegel

¹⁰ Het klopt wel ongeveer als de enige fout bijvoorbeeld (‘low order’) sferische aberratie is. Bij zeven (goede en slechte) van de door mij interferometrisch geteste spiegels leverde dit ratio’s op variërend van 1/3.29 – 1/3.47. Ik heb echter

nog geen spiegel gezien die uitsluitend low order sferische aberratie als fout had, dus in de praktijk gaat dit rekensommetje daarom gewoonlijk niet op.

¹¹ Het is mogelijk dat je moet inloggen bij de interferometry mailinglist om de twee nu volgende voorbeelden te kunnen zien. Het is zeker de moeite waard ze goed te bekijken.

¹² <http://tech.groups.yahoo.com/group/interferometry/files/Steve%20Koehler/PV%20vs.%20RMS/pv.png>

¹³ <http://tech.groups.yahoo.com/group/interferometry/files/Steve%20Koehler/PV%20vs.%20RMS/rms.png>

¹⁴ Aangenomen een glad oppervlak.

beter zijn dan $1/10 \lambda$. Het betekent echter niet automatisch, dat die spiegel beter presteert dan een spiegel met bijvoorbeeld een rating van $1/6 \lambda$ P-V. Een spiegel met een $1/6 \lambda$ P-V wavefrontfout, met daarnaast een goede en zeer weinig variërende oppervlaktevorm, zal zelfs iets beter presteren dan een met een rating van $1/10 \lambda$ P-V wavefront fout, maar daarnaast wat meer variatie in oppervlaktevorm. Beide zullen overigens heel goed zijn. Waar zie je dan aan dat de eerste beter is? Aan de *RMS-error* en de *Strehlratio*, die anders dan de P-V fout, betrekking hebben op het totale spiegeloppervlak.

Waarom RMS of Strehlratio: een voorbeeld

RMS en Strehlratio geven informatie over de kwaliteit van het gehele spiegeloppervlak en niet alleen over het verschil tussen hoogste en laagste punt. Nemen we als voorbeeld spiegel A ($1/4 \lambda$ P-V) en spiegel B ($1/10 \lambda$ P-V), beide getest met 100 meetpunten. Dat is niet veel, maar voldoende voor een voorbeeld. Spiegel A heeft - naast die $1/4 \lambda$ P-V fout¹⁵ - op 2 meetpunten punten een wavefrontfout van $1/40 \lambda$, op 8 punten een wavefrontfout van $1/100 \lambda$, op 17 punten een fout van $1/25 \lambda$ en op 71 punten een fout van $1/30 \lambda$. Spiegel B heeft op 8 meetpunten een afwijking van $-1/22 \lambda$, op 40 punten een afwijking van $1/23 \lambda$ en op 47 punten een afwijking van $1/21 \lambda$. De RMS wavefrontfouten nu, zijn voor de spiegel A en spiegel B respectievelijk 0.0197λ en 0.0292λ en de Strehlratio's respectievelijk 0.984 en 0.966 . Spiegel A is dus juist beter dan de Spiegel B en niet slechter zoals de P-V waarden suggereren¹⁶. Dit komt omdat het oppervlak van spiegel A veel minder variatie vertoont dan dat van spiegel B. Zouden we van de $1/4 \lambda$ spiegel (A) een $1/2 \lambda$ P-V spiegel maken en de rest van de meetpunten ongewijzigd laten, wordt de RMS wavefrontfout van die spiegel 0.0365λ en de Strehlratio 0.947 . Ook een uitstekende spiegel dus en niet eentje die, als we uit zouden gaan van de P-V fout, 'ronduit slecht' is.

Soms, langs een achterdeurtje.....

Een goed artikel waarin wordt verwoord dat het beter is om P-V maar te vergeten als het gaat om een kwaliteitsoordeel over spiegels, is het artikel van R.F. Royce (literatuur 11). Alleen gaat hij aan het eind helaas toch de mist in, door een omrekening te formuleren voor P-V naar Strehlratio. Hij bedoelt dan uitsluitend de P-V voor zover die wordt veroorzaakt door de correctiefout van de spiegel, dus de sferische aberratie. Dit zegt dus (lang) niet alles over de spiegel, want gewoonlijk zijn er - zoals blijkt uit interferometrische tests - ook andere fouten (zoals astigmatisme, coma en trefoil) aanwezig, ook al is het - bij goede spiegels - in lichte mate (zie ook de Zambutospiegel in literatuur 13, die iets astigmatisme heeft).

De 'omrekenformule' van Royce luidt vrij simpel:

- trek van de noemer van de P-V wavefrontfout, '3'af;
- het getal dat je overhoudt is dan het tweede cijfer van de Strehlratio.

Dus de Strehlratio van $1/8$, $1/9$ en $1/10 \lambda$ P-V wavefront spiegel wordt dan - aldus Royce - respectievelijk: 0.95 , 0.96 en 0.97 .

Het lijkt een mooie 'vuistregel', maar hij gaat in de praktijk niet op. Twee voorbeelden van door mijzelf gemaakte en interferometrisch geteste spiegels.

¹⁵ De P-V fout van Spiegel A bestaat uit één meetpunt van $-1/8$ en één meetpunt van $1/8 \lambda$, de P-V fout van spiegel B uit twee meetpunten van $1/20$ en drie meetpunten van $-1/20 \lambda$

¹⁶ Zie ook Wyant (literatuur 9, pag. 36): "An optical system having a large P-V error may actually perform better than a system having a small P-V error"

1. Een 20 cm spiegel heeft een Strehlratio van 0.976, alle afwijkingen – hoe klein ook - meegerekend. Kijk ik alleen naar de sferische aberratie, dan is de P-V wavefrontfout $1/17 \lambda$. Trek nu van 17 het getal 3 af, houd je 14 over. Je krijgt dan met de regel van Royce een Strehlratio van 0.914. Erg laag dus, want in werkelijkheid is de Strehlratio als alleen de sferische aberratie wordt meegeteld 0.991. Maar...het belangrijkste is, dat die spiegel in werkelijkheid – alles meegerekend - geen Strehlratio heeft van 0.914, of van 0.991, maar van 0.976.
2. Een 25 cm spiegel, heeft – alles meegerekend - een Strehlratio van 0.965. De P-V fout als alleen sferische aberratie wordt gerekend is $1/12 \lambda$. Dat zou - aldus Royce - betekenen een Strehlratio van 0.99. Echter, de Strehlratio als alleen sferische aberratie wordt meegeteld is in werkelijkheid 0.975, één procent hoger dan de echte Strehlratio van de spiegel.

Onzin dus en alleen maar verwarrend, die regel van Royce¹⁷. Hij probeert het eenvoudig en begrijpelijk en te maken, maar maakt er een rommeltje van. Hij kan zijn achterdeurtje beter dicht laten, dan is zijn verhaal prima en wel zo helder.

Voor meer algemene informatie over het testen van telescoopspiegels, zie:

<http://www.janvangastel.nl/Astronomy/Het%20testen%20van%20telescoopspiegels.pdf>

Conclusie

Concluderend kunnen vaststellen dat:

1. De P-V wavefrontfout *geen goede manier* is om de kwaliteit van een telescoopspiegel aan te geven¹⁸.
2. De P-V fout *los staat* van de rms-fout en de Strehlratio en er dus *geen omrekenformule* is om vanuit de P-V wavefrontfout de rms-wavefrontfout en de Strehlratio te berekenen.
3. De rms wavefrontfout en de Strehlratio *beide geschikte grootheden* zijn om de kwaliteit van de optiek vast te stellen. De *Strehlratio* lijkt daarvan de meest geschikte, omdat:
 - de Strehlratio *rechtstreeks* betrekking heeft op *prestatie* van de optiek en niet op de (oppervlakte)fouten;
 - een in percentage van het 'ideaal' uitgedrukt kwaliteitsniveau *intuïtief gemakkelijker* te hanteren is dan de kwaliteit uitgedrukt in rms-cijfers;
 - de kwaliteit van de spiegel *beter* is naarmate de Strehlratio *hoger* is, wat intuïtief ook gemakkelijk te hanteren is.

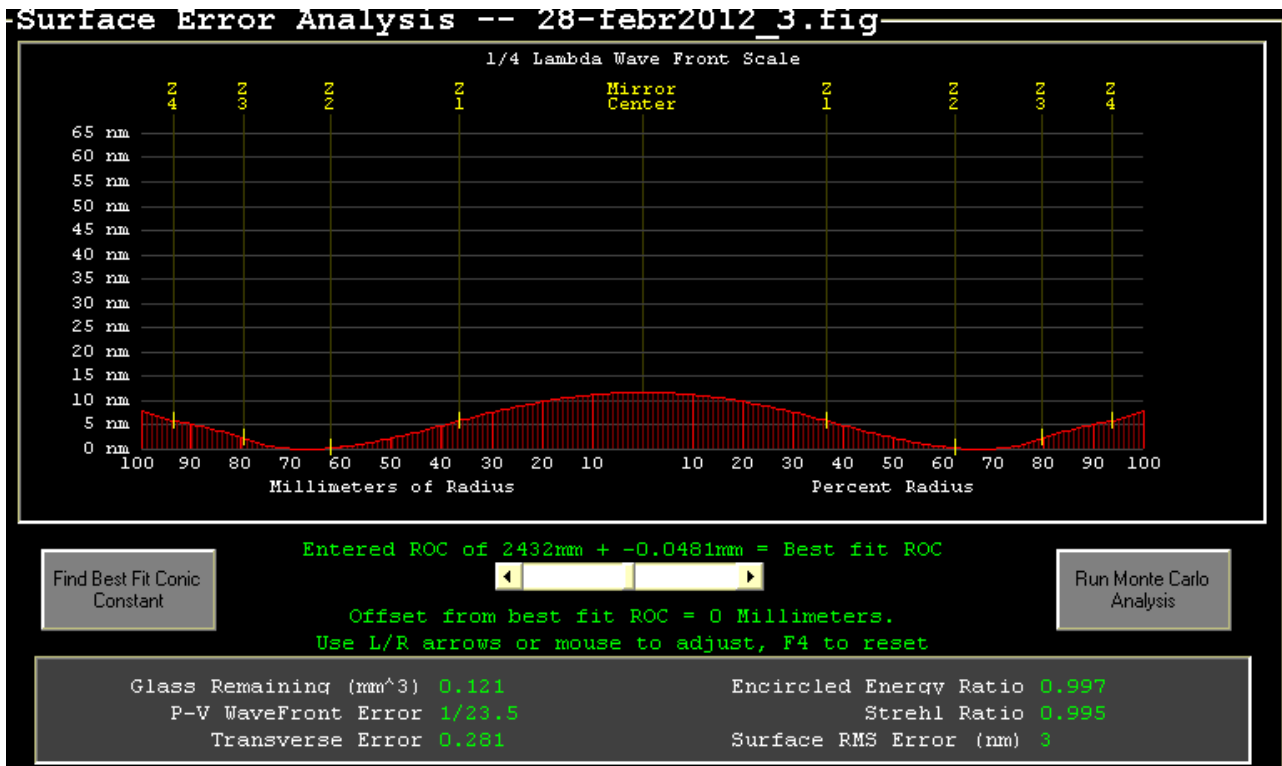
¹⁷ Een ander '(schoonheids) foutje' van Royce is, dat hij zegt spiegels te leveren met een RMS van maximaal 0.032 en een Strehlratio van minimaal 0.96...maar in rood licht (633nm). Hij zegt het er netjes bij, maar in zichtbaar licht (550nm) wordt die Strehlratio dan wel wat lager, namelijk 0.948. Ook uitstekend natuurlijk, maar waarom het niet even omgerekend.

¹⁸ Het gaat hier om de kwaliteit van de spiegel als totaal. De grootte van *afzonderlijke fouten*, zoals sferische aberratie en astigmatisme kan wel in P-V worden aangegeven.

Literatuur

1. Mel Bartels: rating mirrors
<http://www.bbastrodesigns.com/ratemirrors.html>
2. Vladimir Sacek: Telescope aberrations: types and causes
<http://www.telescope-optics.net/aberrations.htm>
3. Vladimir Sacek: Strehl ratio:
<http://www.telescope-optics.net/Strehl.htm>
4. Vladimir Sacek: telescope aberrations: Effects on image quality
<http://www.telescope-optics.net/effects1.htm>
5. Peter Karboulonis: Measuring optical quality:
http://www.opticstar.com/Run/Astronomy/Astro-Editorial-Articles-General.asp?p=0_10_19_1_6_200_13
6. Obsession Telescopes (halverwege de pagina):
www.obsessiontelescopes.com/optics/index.php
7. Brian Tung: RMS-error and the Strehl ratio:
<http://www.astronomycorner.net/notes/strehl.html>
8. Teleskop-service: Die Definition der Oberflächenqualität eines Spiegels:
<http://www.teleskop-service.de/Allgemein/QualitaetNewton/qualiaetnewton.htm#definition>
9. J.C. Wyant: Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology:
http://www.researchgate.net/publication/252862255_Basic_Wavefront_Aberration_Theory_for_Optical_Metrology (vanaf pagina 36 onderaan).
10. Jim Burrows: P-V vs. RMS
http://home.earthlink.net/~burrjaw/atm/pv_rms.lwp/pv_rms.htm
11. R.F. Royce: A better method of measuring optical performance:
<http://www.rfroyce.com/standards.htm>
12. Armin Quante: Prüfung eines TAL-2M-Spiegels durch Wolfgang Rohr:
http://www.die-talianer.de/html/spiegeltest_2m.html
13. Wolfgang Rohr: Carl Zambuto Newton
<http://www.astro-foren.de/showthread.php?9233-Carl-Zambuto-Newton>
14. Optical Technologies: What is an optic surface figure?
<http://optical-technologies.info/?tag=peak-to-valley-vs-rms>
15. L.C. Roberts Jr *et al.*, Is that really your Strehl ratio?," in *Proc. of SPIE* 5490, 2004.
<http://www.flatwavefronts.com/uploads/papers/IsThatReallyYourStrehlRatio.pdf>
16. John Nichol (Nichol Optical): Optical standards.
http://www.nicholoptical.co.uk/Articles_new.htm

Foucaulttest resultaten 20 cm spiegel



Let in dit rapport vooral op de zeer hoge Peak-to-Valley waarde van $1/23.5 \lambda$. De RMS wavefront fout bedraagt $2 \cdot 3/550 = 0.011 \lambda$ en de Strehlratio is 0.995. Vergelijk dit met de interferometrische testresultaten op de volgende pagina.

Interferometrische testresultaten 20 cm spiegel

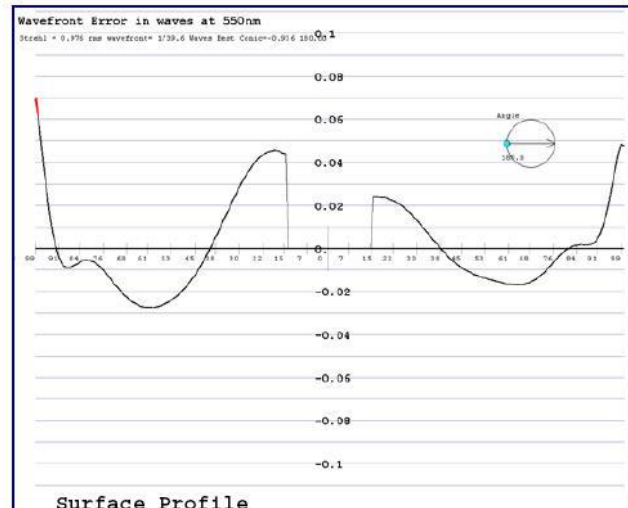
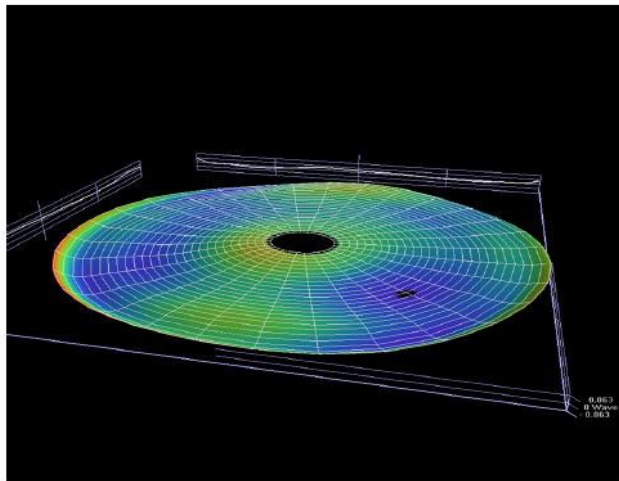
OpenFringe Report

199 mm f6

Mon May 14 09:51:21 2012

Wavefront error in Waves at 550nm RMS: 0.025 Strehl: 0.976
 Best Conic=-0.936 Desired Conic: -1.00
 Artificial Null: 0.437
 Calculated Bath astig wavefront PV 0.005 Waves. Residual after removal: -0.017 Waves
 Igram Wavelength: 650.0nm
 Diameter: 199.00 mm
 ROC 2432.00 mm

	Wyant	RMS				
Piston	0.000	0.000	Disabled	Y 2nd Astig	-0.000	0.000
X Tilt	0.000	0.000	Disabled	X 2nd Coma	-0.009	0.003
Y Tilt	0.000	0.000	Disabled	Y 2nd Coma	-0.020	0.007
Defocus	-0.000	0.000	Disabled	2nd Spherical	-0.003	0.001
X Astig	-0.011	0.005		X Tetrafoil	0.029	0.011
Y Astig	0.009	0.004		Y Tetrafoil	-0.006	0.002
X Coma	0.001	0.000		2nd X Trefoil	-0.004	0.001
Y Coma	-0.006	0.003		2nd Y Trefoil	-0.011	0.004
Spherical	0.028	0.015		3rd X Astig	0.006	0.002
X Trefoil	0.005	0.002		3rd Y Astig	0.010	0.003
Y Trefoil	0.002	0.001		3rd X Coma	0.000	0.000
X 2nd Astig	0.014	0.005		3rd Y Coma	-0.011	0.003



Het interferometrisch testrapport hieronder geeft voor dezelfde 20 cm spiegel als boven een RMS wavefrontfout van 0.025λ en een Strehlratio van 0.976 . Het rapport geeft geen P-V waarde vanwege de irrelevantie daarvan. In de tabel boven de plaatjes staan alle mogelijke afwijkingen van het ideaal die door het programma worden berekend. Naast de 'low order' sferische aberratie (rms 0.015λ), zijn, zoals in de tabel is te zien, meer kleine foutjes aanwezig die samen enig effect hebben op de rms fout en de Strehlratio. In de Foucaulttest worden die niet gemeten, maar hoogstens meegenomen als een soort van 'ruis' in de gemeten sferische aberratie.