

Het testen van telescopspiegels¹: een inleiding voor gebruikers van telescopen en amateur spiegelmakers

(door Jan van Gastel)

Deze notitie gaat over *het testen van hoofdspiegels van telescopen*. Hoe een telescoop *als geheel* presteert hangt niet alleen af van de kwaliteit van de hoofdspiegel. Andere belangrijke oorzaken van slechte of in elk geval 'suboptimale' prestaties kunnen bijvoorbeeld zijn:

- De kwaliteit van de vangspiegel;
- De grootte van de obstructie;
- De kwaliteit van de collimatie;
- De ophanging van de optiek;
- Het verschil tussen de temperatuur van de optiek en van de omgevingstemperatuur;
- Temperatuurverschillen binnen de optiek, bijvoorbeeld de rand die kouder is dan het centrale deel;
- Lichaamswarmte in de lichtweg;
- Onvoldoende of slechte baffeling;
- Slechte seeing.

Als de optiek goed is, kan er dus nog van alles de kwaliteit van het beeld verstoren. Echter: als de optiek *niet goed* is, kun je de andere hierboven genoemde zaken optimaliseren zoveel je maar wilt: de prestaties worden nooit goed. De optiek vormt het hart van de telescoop en als dat hart niet goed is, blijft de prestatie onder de maat, wat je ook doet.

Twee wegen

Als je telescoop niet goed presteert en je weet niet waardoor het komt, staan in principe twee wegen open om de prestatie te verbeteren:

1. *Alle hierboven genoemde zaken in orde maken* en de optiek laten voor wat die is. Het is goed mogelijk dat het probleem dan is opgelost en dat de telescoop beduidend betere beelden gaat leveren dan voorheen. Je weet dan echter nog niet of het nog beter kan, als je de kwaliteit van je optiek niet kent. Ben je volledig tevreden, is dat geen punt, ben je niet tevreden of onzeker over de vraag of het nog beter kan, kun je je optiek laten testen.
2. *Eerst je optiek laten testen*, zodat je van tevoren weet wat de kwaliteit daarvan is. Is die *niet goed*, kun je misschien het beeld verbeteren door alle andere factoren in orde te maken, maar daar is dan wel een grens aan: *de grens van de optische kwaliteit*. Wil je dan toch beter, kun je nieuwe optiek aanschaffen of de optiek die je hebt verbeteren of dat laten doen. Is de optiek wel goed, weet je in elk geval dat het zinvol is om alle andere zaken in orde te brengen. Als die allemaal al puik in orde waren, had je misschien te hoge verwachtingen die je zult moeten bijstellen.

Persoonlijk ben ik voor de onder 2 genoemde weg, maar uiteraard is het net zo legitiem om voor de weg, uiteengezet onder punt 1 te kiezen.

¹ Wil je je spiegel uitgebreid laten testen op alle hieronder genoemde criteria: klik dan [hier](#).

Het doel van het testen van optiek

Het doel van testen² van optiek is **het voorspellen van de prestatie** van de optiek. Dat betekent, dat optiek die uit de relevante test(s) als 'goed' naar voren komt beter presteert dan een die als 'matig' of 'slecht' uit de test komt en gebruikt wordt onder dezelfde omstandigheden.

Wat bepaalt de kwaliteit van een spiegel?

Er zijn verschillende kenmerken die de kwaliteit van een telescoopspiegel bepalen:

1. *De vorm van de spiegel.* Er zit bijvoorbeeld sferische aberratie in de spiegel, of astigmatisme. Sferische aberratie wil zeggen dat de spiegel ten opzichte van de 'ideale paraboloïde' te weinig of juist teveel is gecorrigeerd. Daardoor wordt niet al het licht naar de juiste plek in het brandpunt gefocust, maar komt een deel terecht in de diffractieringen. Dit leidt tot vermindering van contrast. Ook kan de spiegel *astigmatisch* zijn. Hij heeft dan eigenlijk twee brandpunten. Dat wil eveneens zeggen dat het licht niet naar de juiste plek gefocust wordt, met contrastverlies ten gevolge. Er zijn meer van dit soort vormfouten, maar dit zijn de twee die het meest voorkomen. De enige manier om deze fouten te corrigeren is de spiegel opnieuw paraboliseren, soms zelfs – vooral bij astigmatisme - eerst opnieuw polijsten.
2. *De rand van de spiegel.* Strikt genomen hoort de kwaliteit van de rand van een spiegel ook tot de vorm van de spiegel, maar omdat deze fout erg veel voorkomt is het belangrijk die apart te noemen. De meest voorkomende wat dit betreft is een naar beneden gebogen rand, ook wel 'afgevalen' rand genoemd. In het Engels '*turned down edge*' of kortweg TDE. Het gaat vaak maar om enkele millimeters, maar zelfs dat kan al leiden tot contrastverlies. Ook het omgekeerde: omhoog gebogen rand of TUE komt voor, maar veel minder dan TDE. Om de TDE echt te verwijderen is het eveneens nodig dat de spiegel opnieuw geparaboliseerd wordt, maar gelukkig is voor dit probleem ook een snelle en goedkope oplossing: *schilder de afgebogen millimeters zwart, of maak een ring die deze millimeters afdekt*. Het lichtverlies is zo weinig dat je er niets van merkt, maar je krijgt er wel een contrastrijker beeld mee.
3. *De gladheid/ruwheid van het spiegeloppervlak.* Het gepolijste oppervlak van de spiegel hoort glad te zijn. Een ruw oppervlak verstrooit het licht en dat zorgt voor contrastverlies, ongeveer op dezelfde manier als een TDE. De ruwheid heeft te maken met gebrekkige parabolisatietechnieken, met te snel werken, teveel of te weinig druk tijdens het paraboliseren, te koude pek en/of slecht gereedschap. Ruwheid kan alleen worden weggewerkt door opnieuw te paraboliseren
4. *Zones.* Het oppervlak van de spiegel moet zo egaal mogelijk zijn en mag geen diepe, steile zones ('golven') vertonen. Dit soort zones hebben een contrast verlagend effect dat vergelijkbaar is met een TDE. Een TDE is namelijk een zone die zich aan de rand van de spiegel bevindt. Te steile zones kunnen *soms lokaal* worden weggewerkt, maar vaak is het nodig de spiegel terug sferisch te polijsten en opnieuw te paraboliseren

Er is (nog?) geen kwantitatieve test, die al deze kenmerken tegelijk test en in één getal vastlegt. Strikt genomen zijn er alleen kwantitatieve tests die de *vorm van de spiegel* (punt 1 hierboven) testen. Kwaliteitsindicatoren van een spiegel zoals 'Peak-to-Valley (P-V), Root-mean-square (RMS) en Strehlratio geven in wezen alleen informatie over de vorm van de spiegel. De beste op dit moment beschikbare kwantitatieve test voor de vorm van de spiegel is de interferometrische test. Oorspronkelijk was die alleen toegankelijk (betaalbaar) voor professionele spiegelmakers,

² We hebben het hier uiteraard steeds over tests die (a) geschikt zijn voor het voor bovenstaand geformuleerd doel testen van optiek, die (b) goed worden uitgevoerd en die (c) goed en begrijpelijk en op de juiste manier worden gerapporteerd.

maar met de komst van de Bath interferometer en daarvoor beschikbare gratis software is daar de afgelopen jaren verandering in gekomen. De veel gebruikte Foucaulttest, ook een kwantitatieve test voor de vorm van de spiegel, meet in wezen alleen *sferische aberratie* en zelfs dat nog niet echt betrouwbaar³. Deze test is helaas relatief blind voor de andere veel voorkomende vormfout: *astigmatisme*.

Voor de vorm van de spiegel zijn naast kwantitatieve ook kwalitatieve tests. Bekend zijn bijvoorbeeld de *autocollimatietest*, de *Ross nul test* en de *Waineo null test*. En natuurlijk de *stertest*. Deze tests zijn in principe net zo geschikt om de vorm van de spiegel vast te stellen als een kwantitatieve, maar de interpretatie is alleen zinvol als die geschied door iemand die hiermee ervaring heeft. Voor de *stertest* is geen ander instrument nodig dan de telescoop. In principe kan iedereen die daar voldoende tijd en energie in steekt leren *stertesten* en dus de eigen telescoop leren beoordelen.

De *kwaliteit van de rand* van de spiegel kan – kwalitatief – goed worden beoordeeld met een Ronchitester en een Foucaulttester, de mate van *ruwheid/gladheid* met een Foucaulttester⁴. In tegenstelling tot voor de vorm van de spiegel zijn hiervoor echter geen redelijk algemeen geaccepteerde normen die zeggen wanneer een rand teveel TDE vertoont of wanneer een oppervlak te ruw is. Het is daarom het beste hiermee aan de veilige kant te gaan zitten en zoveel mogelijk te kiezen voor ‘geen TDE’ en ‘geen in de Foucaulttest zichtbare ruwheid’.

Zones mogen niet te diep zijn. Een maat die wel gebruikt wordt is, dat de helling van een zone niet meer mag zijn dan ½ boogseconde op het spiegeloppervlak. Deze helling wordt berekend met de formule $h = \arctan(d/b)$, waarin h de hoek is in boogseconden, d die diepte van de zone en b de breedte van de zone. De diepte en breedte van de zone kunnen worden afgelezen van een interferometrische analyse. Een voorbeeld: stel de diepte van een zone, gemeten aan het golffront is $1/5$ lambda en de lengte 20 millimeter, wat is dan de hellingshoek? Omdat de diepte is gemeten aan het golffront moeten we eerst terugrekenen naar het spiegeloppervlak, waar de diepte de helft daarvan is, dus $1/10$ lambda. Voor zichtbaar licht (550 nm) is dat 55 nm (nanometer) ofwel 0.000055 millimeter. De hellingshoek is dan $\arctan(0.000055/20) * 3600 = 0.62''$. Dat is meer dan de norm van $0.5''$, dus teveel. Ook kom je wel als criterium tegen dat een zone niet dieper mag zijn dan $1/8$ golflengte (wavefront)⁵. Het beste is ervoor te zorgen dat aan allebei deze criteria voldaan wordt.

Hoewel vaak alleen over de vorm van de spiegel wordt gesproken als het over kwaliteit gaat, zijn **al deze zaken zijn even belangrijk**, uiteraard afhankelijk van de mate waarin zij voorkomen. Een heel klein beetje sferische aberratie bijvoorbeeld, of een heel klein beetje astigmatisme is geen probleem. Maar, om een voorbeeld te noemen: *een spiegel die qua vorm heel goed is en die een goede rand heeft en geen duidelijke zones, maar een erg ruw oppervlak is nog steeds geen goede spiegel*. Heel vaak komt in de praktijk een combinatie voor van (een aantal van) de bovengenoemde problemen.

³ Zie dit artikel: http://members.ziggo.nl/jhm.vangastel/Astronomy/De%20Foucaulttest_bulletin.pdf

⁴ Micro-ruwheid is vast te stellen met een variant op de Foucaulttest, de Lyottest of de fase-contrast test. Dit soort ruwheid is echter voor ons van veel minder belang (gewoonlijk geen waarneembaar effect op de beeldvorming) dan de ruwheid die met een gewone Foucaulttester is vast te stellen.

⁵ <http://www.telescope-optics.net/fabrication.htm>

Het beeld in de telescoop

Je zou met recht kunnen zeggen, dat het uiteindelijk gaat om (de kwaliteit van) het beeld dat de telescoop in gebruik geeft⁶. **Maar:** dat geldt alleen voor mensen die veel ervaring hebben met het beoordelen van telescopen van verschillende kwaliteit, die ook nog eens kunnen beoordelen wat er aan de hand is als de telescoop niet optimaal presteert. In veel gevallen komt dit 'criterium' helaas neer op 'het testen van tevredenheid'. Dit wordt ook wel 'kwaliteitsindicatie als *'social contract'* genoemd⁷. Ben je tevreden, dan zit het wel goed. Veruit de meeste gebruikers van telescopen echter, *tasten hier volledig in het duister* en vertrouwen 'dan maar' op datgene wat de verkoper van de spiegel of de telescoop over zijn product te vertellen heeft. Vaak komt men er pas achter dat het beter kan, nadat men – bijvoorbeeld op een starparty - een keer door een vergelijkbare telescoop heeft gekeken die veel betere beelden bleek te geven. Pas dan gaan mensen nadenken over mogelijke gebreken van hun telescoop. Tevredenheid is in dit opzicht dan ook vaak '*onwetendheid*' of '*onbekendheid*' en staat vrijwel los van de echte kwaliteit van de telescoop. Testen kan dan uitsluitend bieden over wat er wel of niet aan de hand is.

Wat is goed?

Wanneer is een spiegel 'goed' op de vier criteria die hierboven zijn genoemd? Dat is uiteraard vatbaar voor discussie. Voor de vorm van de spiegel hanteer ik zelf de volgende criteria:

Strehlratio⁸	oordeel
< 0.80	slecht
0.80-0.85	redelijk
0.85-0.90	vrij goed
0.90-0.95	goed
0.95-1.00	Zeer goed

Zoals eerder opgemerkt gaat het echter niet alleen om de vorm van de spiegel, maar zijn ook de andere eerder genoemde kenmerken van belang. Een spiegel die op grond van de vorm het predicaat '*goed*' krijgt, kan dus door een ruw oppervlak, een of meer steile zones en/of een TDE toch het oordeel '*matig*' of zelfs '*slecht*' krijgen. Omgekeerd kan een spiegel met een Strehlratio van 0.80 die *zeer glad is, geen zones* bevat en een *goede rand* heeft presteren als een spiegel die qua vorm in de categorie 'vrij goed' zit. Wat 'te ruw' of 'teveel TDE' is en hoeveel het eindoordeel over een spiegel op grond daarvan moet zakken: ook hierover kan men uiteraard van mening verschillen. De oordelen bij de voorbeelden - foto's die hieronder volgen - zijn mijn eigen oordelen. Er bestaat een neiging om bij zaken als ruwheid, TDE en steile zones te zeggen 'het valt wel mee'. Mijn advies luidt echter: *wees ook hier kritisch* als je prijs stelt op een goede spiegel

⁶ Dit is vaak ook het argument – al dan niet expliciet - van spiegelmakers die geen testrapport bij de telescoop leveren.

⁷ <http://www.bbastrodesigns.com/ratemirrors.html>

⁸ Zie dit artikel voor informatie over Strehlratio, RMS en Peak-to-Valley als maten voor het beoordelen van de kwaliteit van telescoopspiegels: http://members.ziggo.nl/jhm.vangastel/Astronomy/pv_rms_strehl.pdf

Voorbeelden

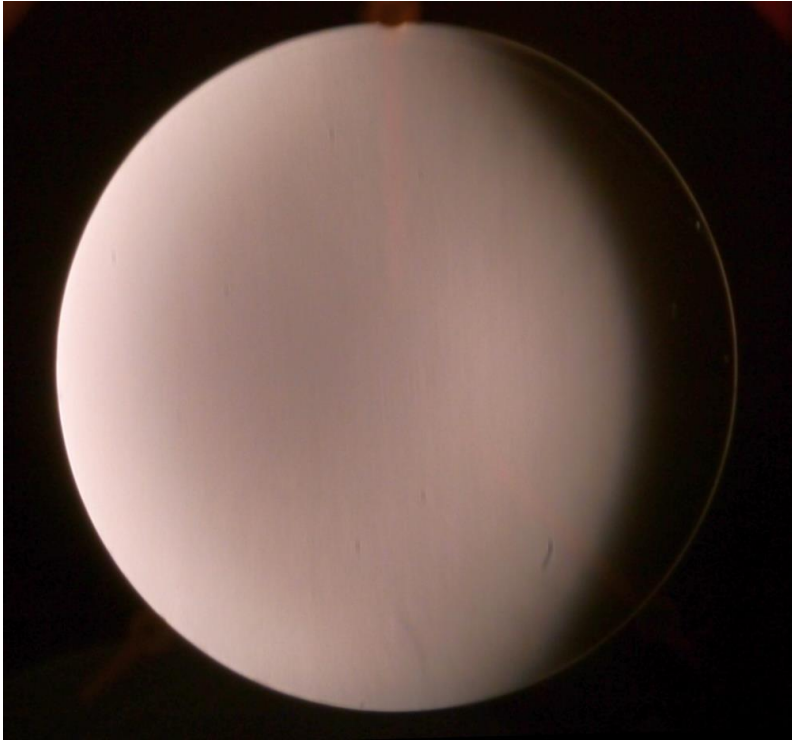
De foto's op de volgende pagina's zijn voorbeelden van spiegels met (a) een ruw oppervlak, (b) een turned down edge (TDE) en te steile zones.

Men kan zoals gezegd van mening verschillen over de vraag of een bepaalde zone, TDE of mate van ruwheid al dan niet 'acceptabel' is. Dat zal iedereen voor zichzelf moeten zelf beslissen, maar wel liefst op basis van kennis. Bij elk type fout hieronder, staat ook minstens een voorbeeld van hoe het in mijn ogen goed is, dus een glad oppervlak, afwezigheid van TDE en geen steile zones. Ik vind alle voorbeelden van ruwe oppervlakken, TDE en te steile zone hieronder onacceptabel, op een of twee uitzonderingen na die het probleem slechts in zeer geringe mate hebben.

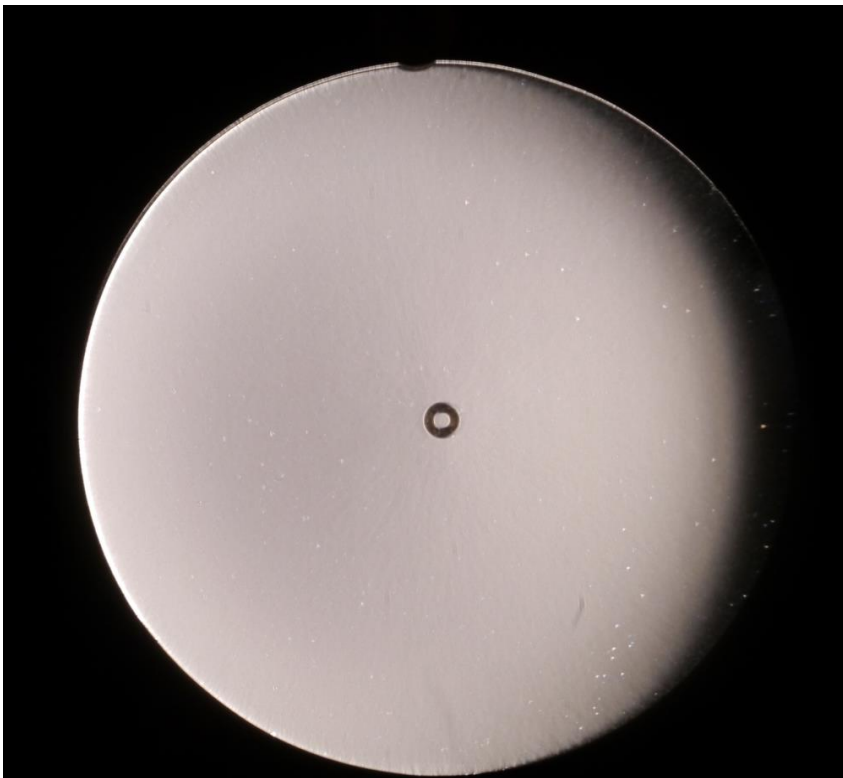
Ruwheid van het oppervlak



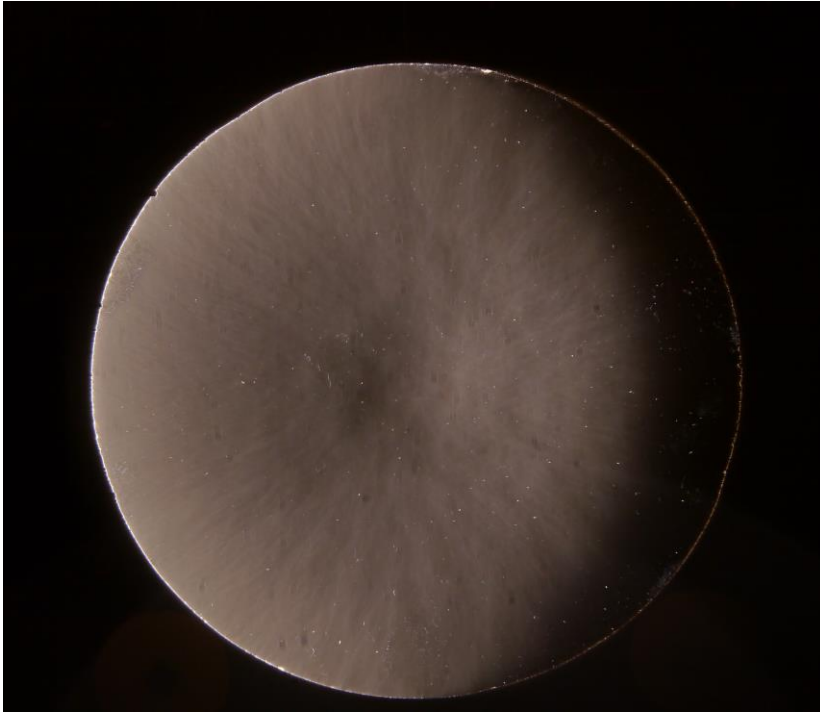
Ruw oppervlak (Foucaulttest) 40 cm spiegel als boven, voor Verbetering.



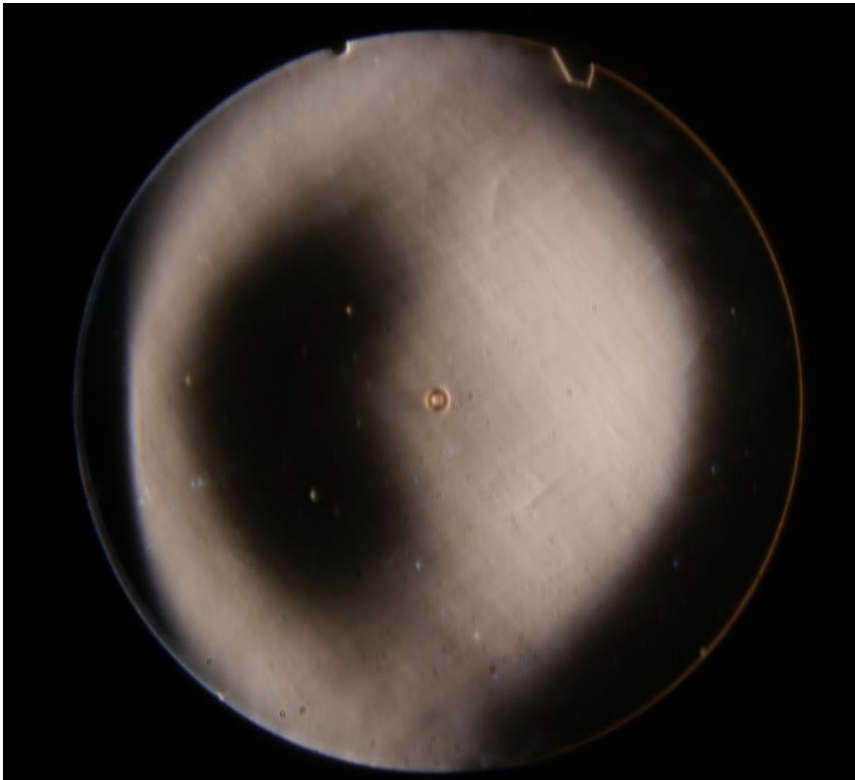
Zelfde 40 cm spiegel als de vorige, nu na verbetering. Zelfde stand van de tester als vorige foto. Nu een glad oppervlak (Foucaulttest).



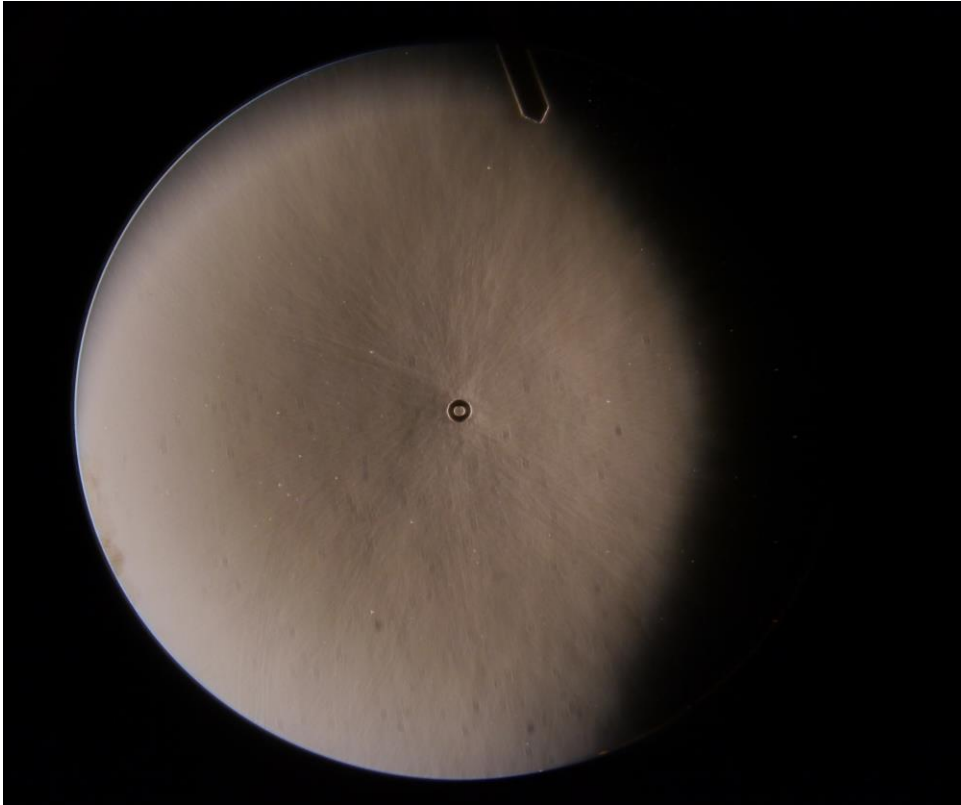
Licht ruw oppervlak 25 cm spiegel



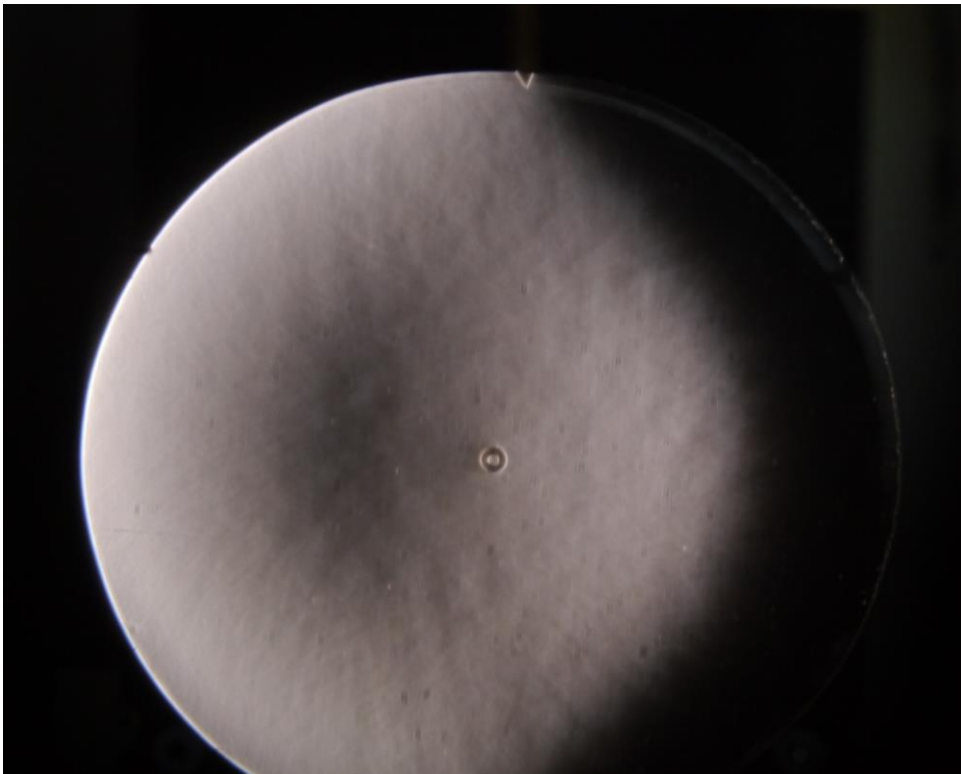
Zeer ruw oppervlak 20 cm spiegel



Zeer ruw oppervlak 40 cm spiegel

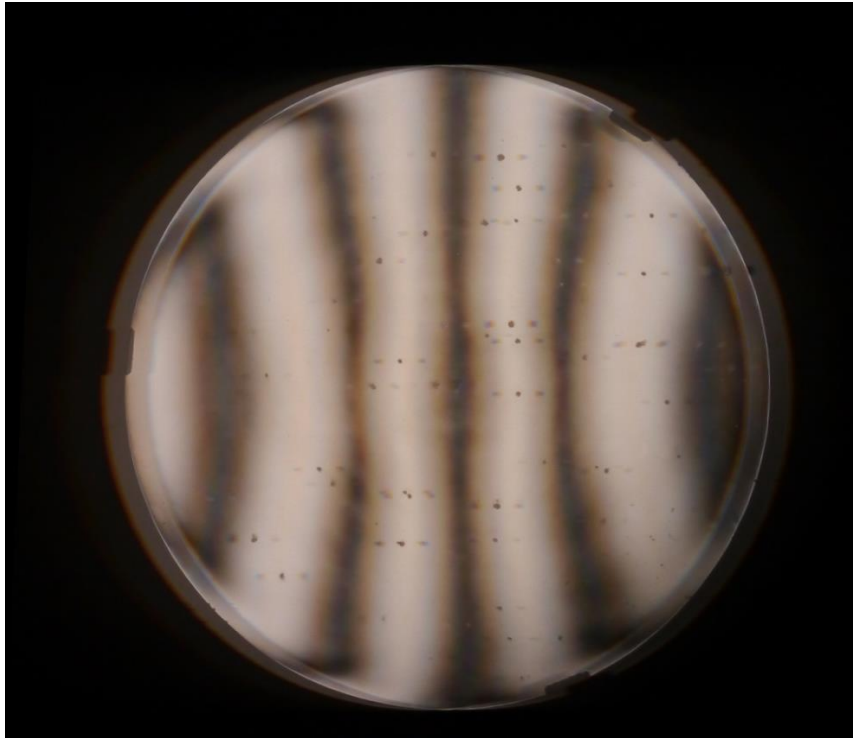


Ruw oppervlak 40 cm spiegel

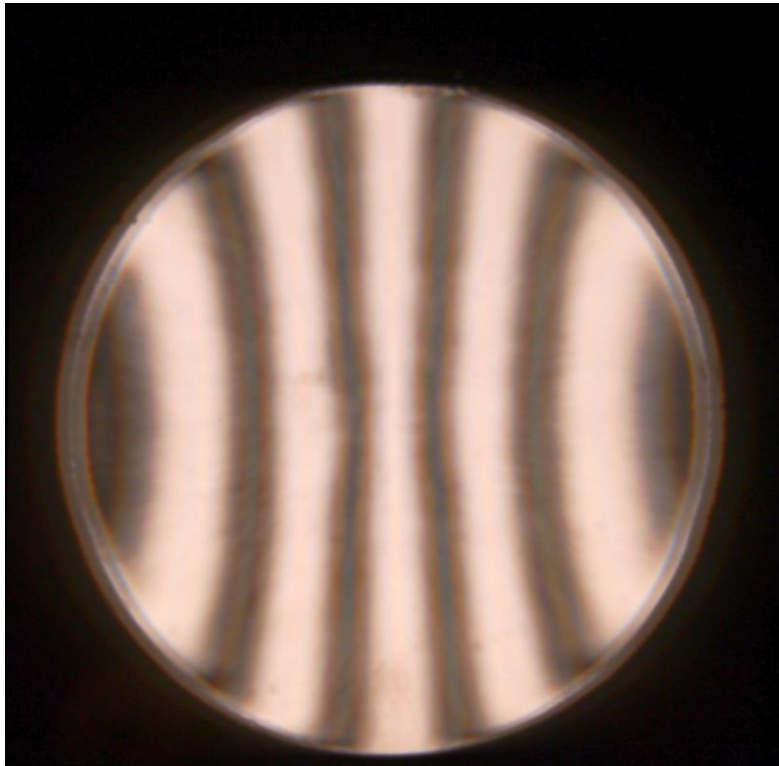


Zeer ruw oppervlak 40 cm spiegel

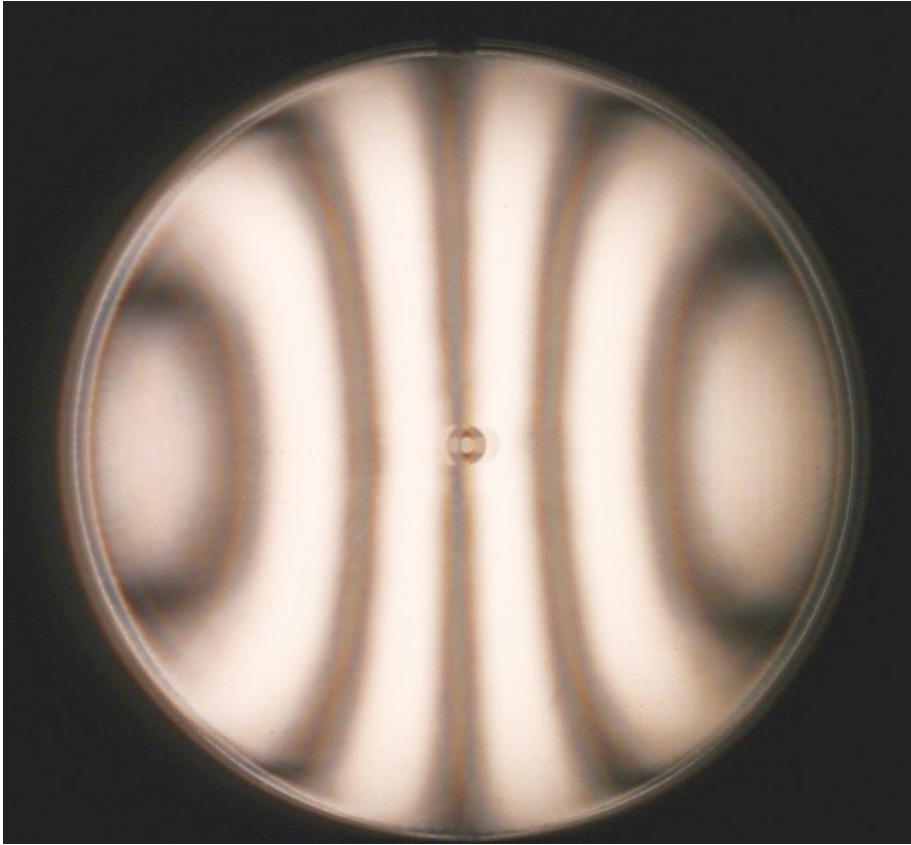
Turned down edge



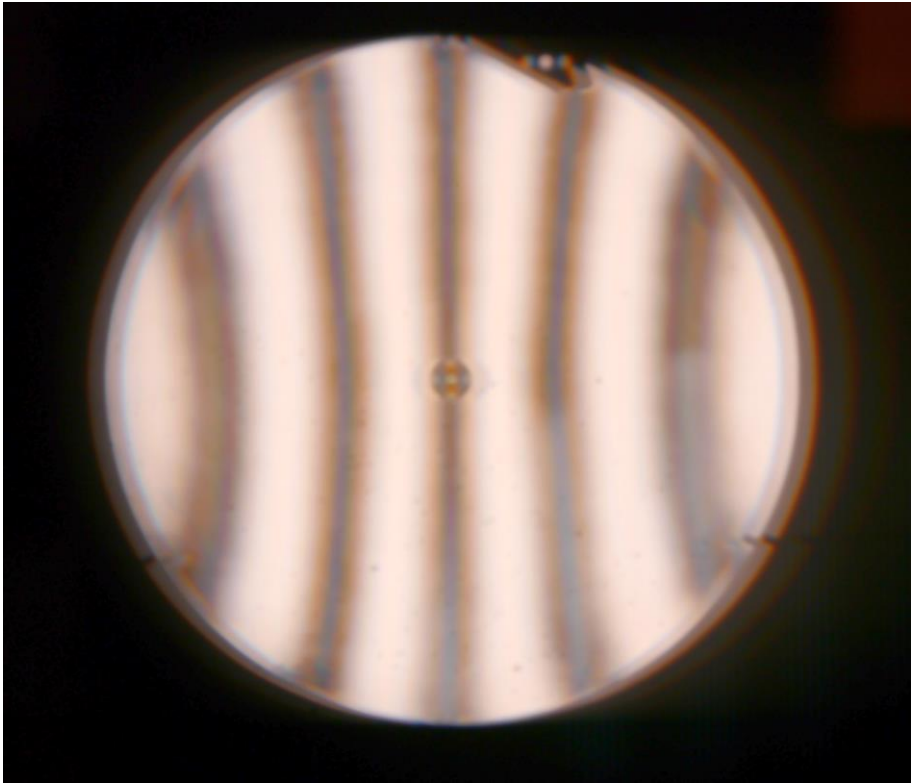
Ernstige TDE: flinke naar buiten wijzende haken aan de einden van de Ronchilijnen



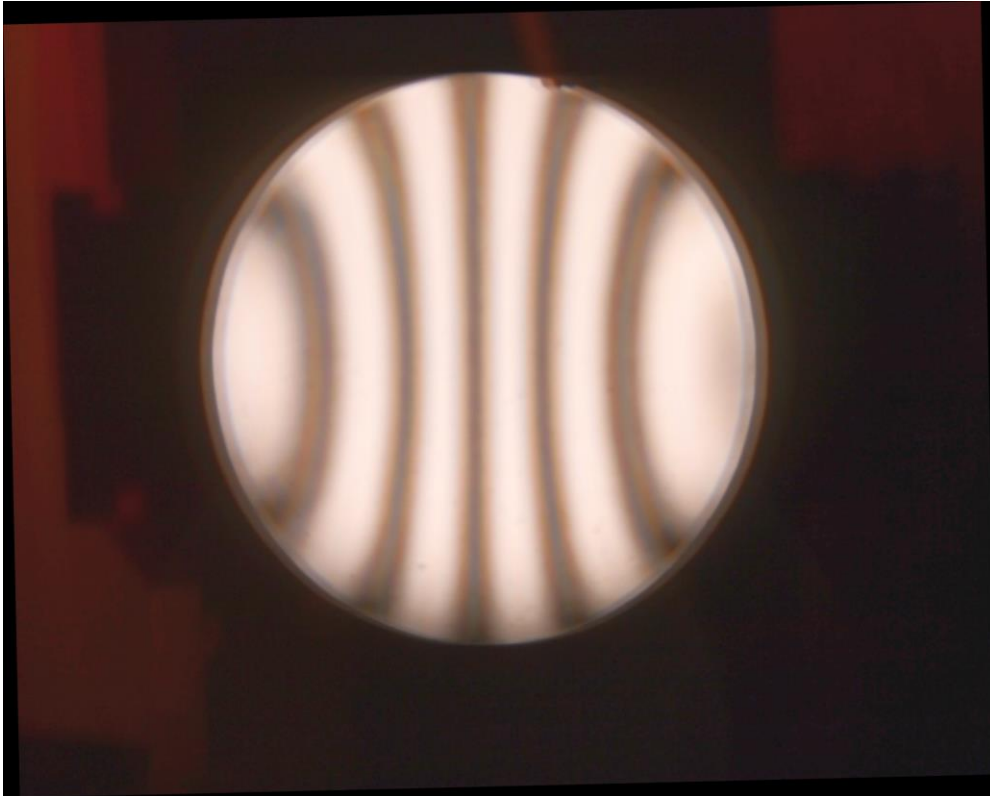
Lichte vorm van TDE: kleine, naar buiten wijzende haakjes aan de uiteinden Van de Ronchilijnen



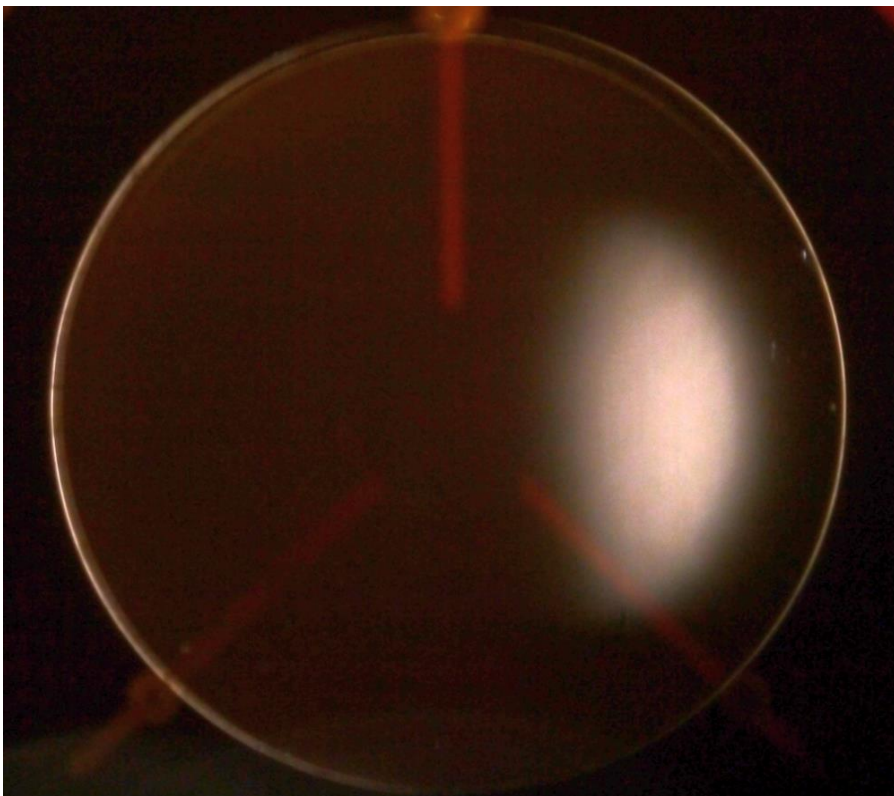
TDE: naar buiten wijzende haakjes aan de einden van de Ronchilijnen



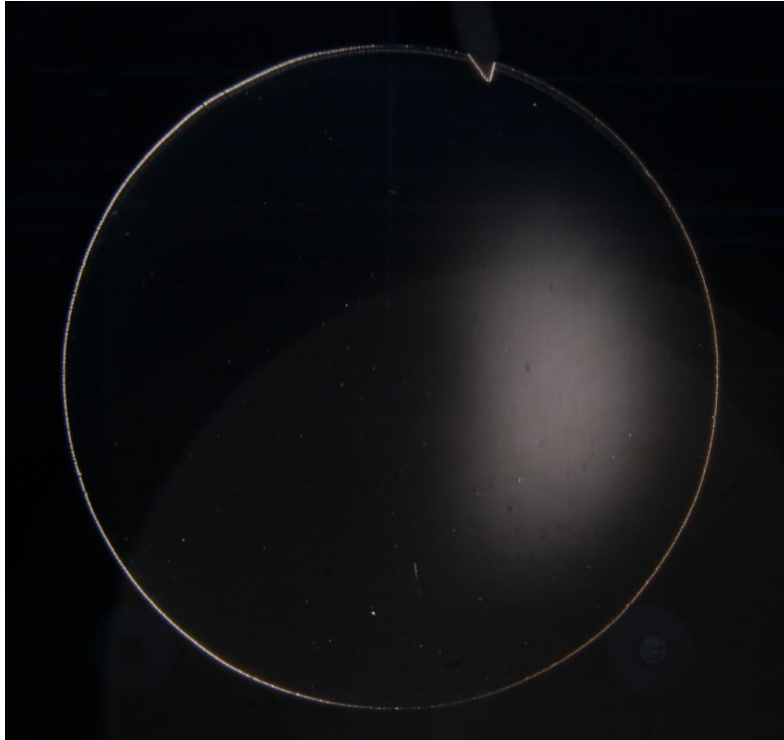
Geen TDE: geen haken aan de uiteinden van de Ronchilijnen



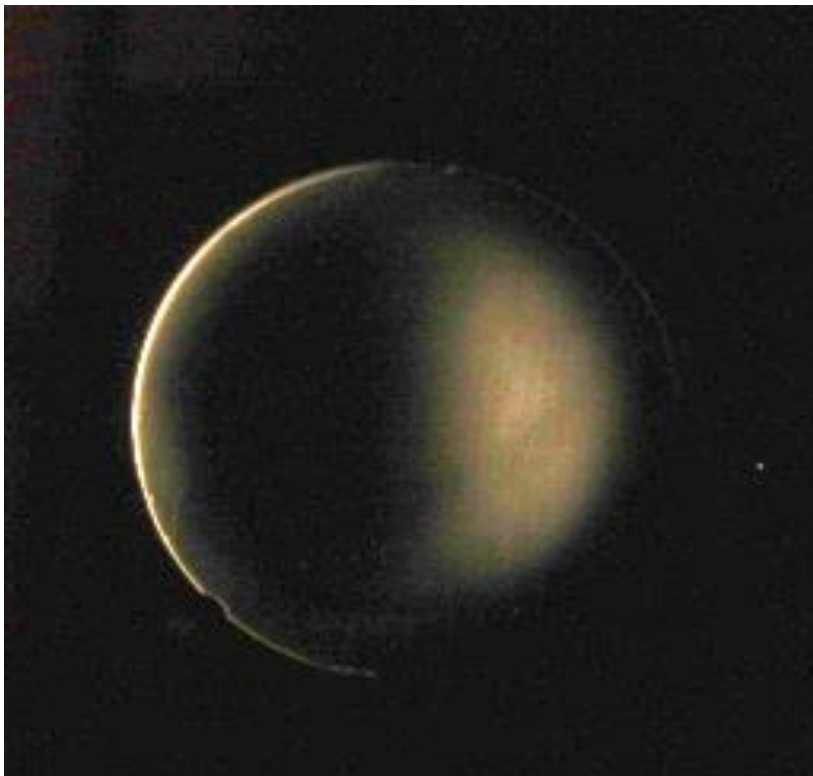
Geen TDE: geen haken aan de uiteinden van de Ronchilijnen



Geen TDE: lichte diffractierand links en rechts op het Foucaultplaatje even helder



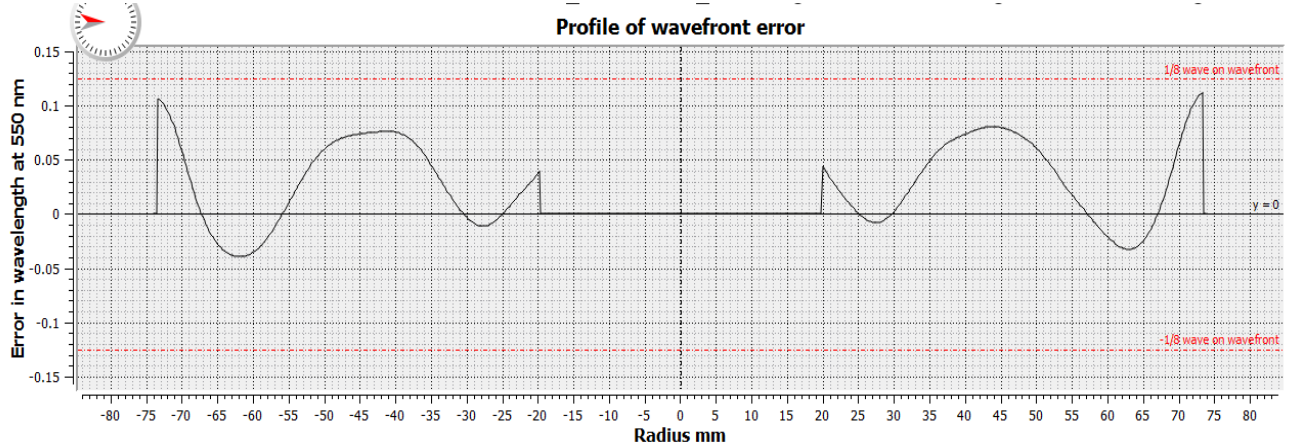
Zeer lichte TDE: diffractierand links wat helderder dan rechts in het Foucaultplaatje⁹



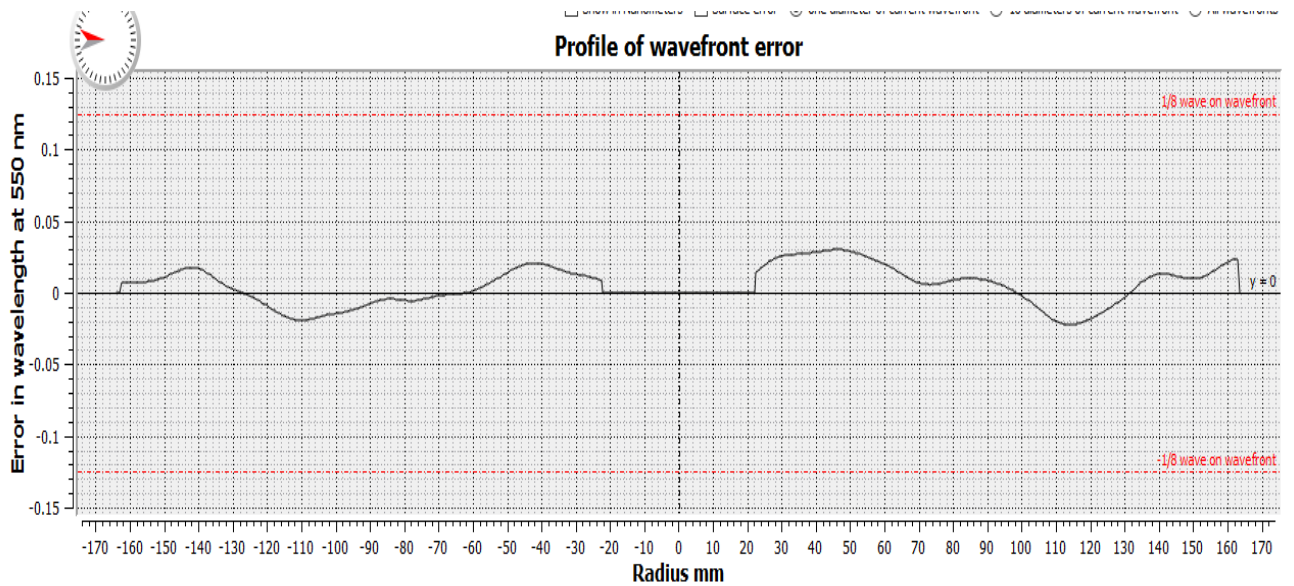
Ernstige TDE: zeer heldere rand aan linkerkant, geen diffractierand aan de rechterkant

⁹ Deze plaatjes zijn voor de situatie waarin de lichtbundel door het mes van de Foucaulttester vanaf rechts wordt ingesneden. Gebeurt dit vanaf links, dan is het omgekeerd. Bij TUE in plaats van TDE zie je het omgekeerde van TDE.

Steile zone(s)



Steile zone: tussen 62 mm en 74 mm – een breedte dus van 12 mm - verloopt het oppervlak 0.14 (1/7) λ dieper dus dan de norm van 1/8 λ . De helling is 0.73 boogseconden, groter dus dan de norm van < 0.5 boogseconden



Spiegel zonder steile zones. Voorbeeld: de zone tussen -140 mm en -110 mm is 0.04 λ diep en 30 mm breed. De helling is dus slechts 0.08 boogseconden, veel kleiner dan de norm van < 0.5 boogseconden.