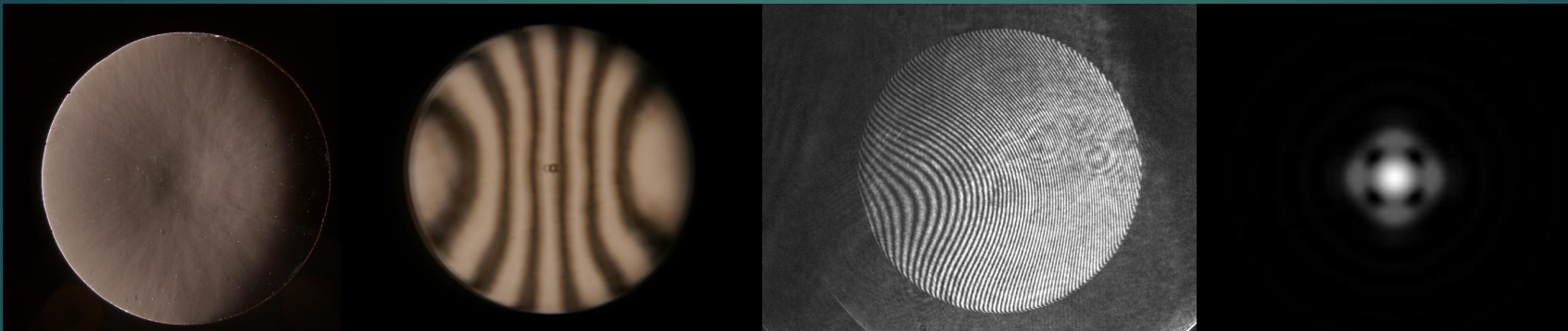


# Het testen van telescoopspiegels



WAT KUN JE WEL, WAT KUN JE NIET MET DE GANGBARE TESTMETHODEN?

JAN VAN GASTEL

(MAART 2015)

# Kritisch testen

Zonder kritisch te testen op alle relevante fouten:

- is het onmogelijk een goede spiegel te maken
- Krijgt een slechte spiegel ten onrechte het predicaat 'goed'
- stellen getallen die de kwaliteit aangeven weinig voor

# Waar horen we in elk geval op te testen?

- Vorm van het optisch oppervlak: sferische aberratie, astigmatisme, zones
- de kwaliteit van de rand: TDE/TUE
- Gladheid/ruwheid van het oppervlak

Soms doen we dat (als amateurs) kwalitatief, soms kwantitatief.

# Door amateurs gebruikte tests

Kwantitatief: er hangt een getal aan

- Foucaulttest
- Wire test
- Caustic test
- Interferometrische test

Kwalitatief: er hangt geen getal aan

- Ronchitest
- Foucaulttest
- Lyottest
- Stertest
- 0-test(s)

# Kwalitatieve tests

- Je kunt zien *of* er fouten zijn
- Je kunt *inschatten* of ze groot of klein zijn
- Je kunt niet meten *hoe* groot of *hoe* klein

Als je een fout maar net kunt zien in een kwalitatieve test: is die dan ook in het echt heel klein of *irrelevant voor de beeldkwaliteit*?

# Zien van fouten in kwalitatieve tests afhankelijk van

- Ervaring van de tester
- Nauwkeurigheid van werken van de tester
- Gevoeligheid van de test in kwestie voor bepaalde fouten
- Het gebruikte testapparaat (hoe is het gebouwd, opgesteld, etc.)
- Omgeving: turbulentie, trillingen e.d.
- De te testen optiek (f/waarde, soort fout, grootte van de fout)

# De Ronchitest: een kwalitatieve test

- Door amateurs meest gebruik: Ronchirooster met 4-6 lijnen per mm
- Nabij het COC

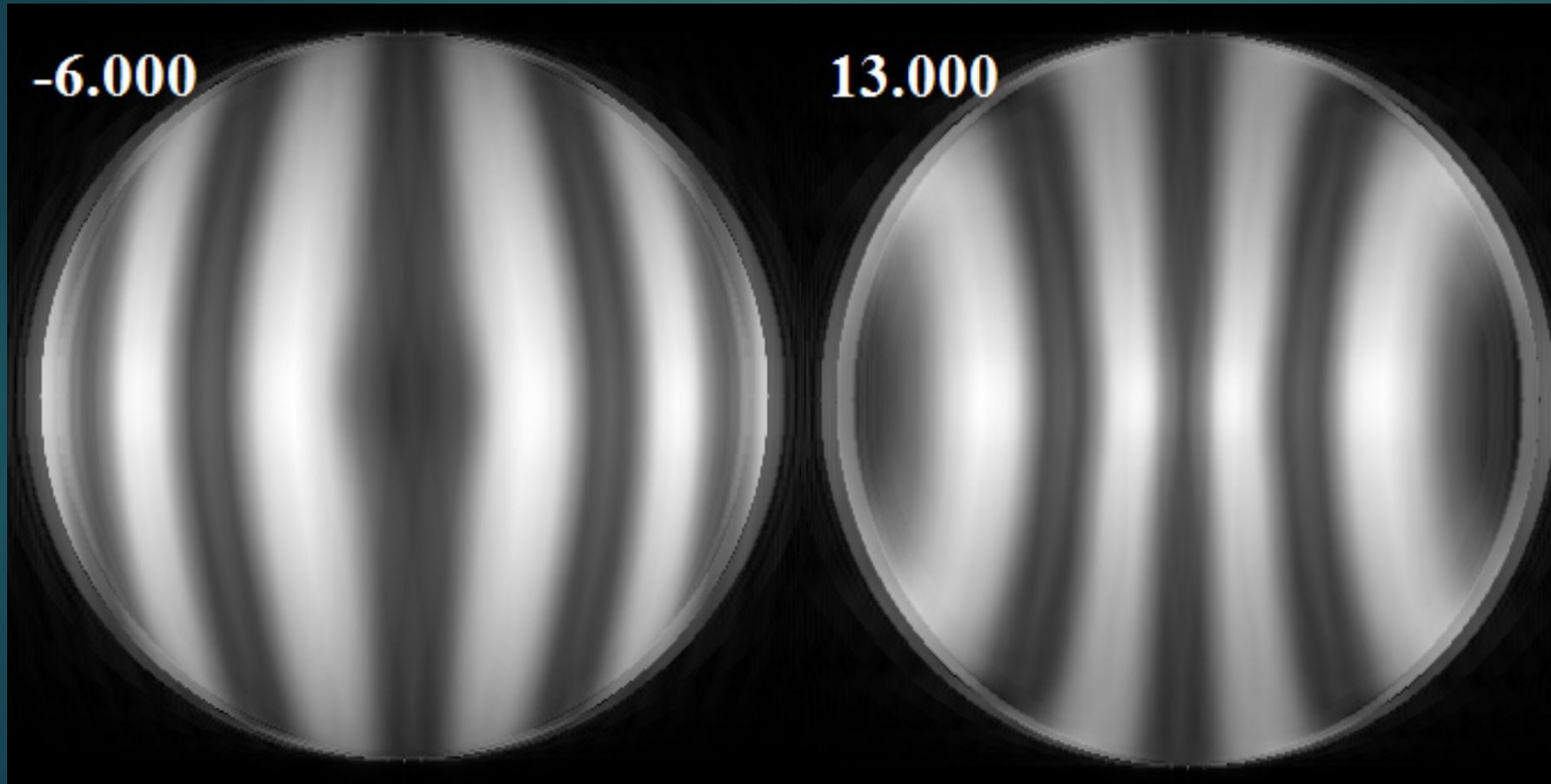
# Gevoeligheid van de Ronchitest

(zoals door amateurs gewoonlijk gebruikt: in/nabij COC)

- **Sferische aberratie:** niet te zien/interpreteren (wel met matching Ronchi test)
- **Astigmatisme:** meestal onderschat,  $\frac{1}{2} \lambda$  is nog goed te zien,  $\frac{1}{4} \lambda$  is moeilijk te zien. Zie je 'een beetje' astigmatisme in Ronchi, dan is het dus al te veel om te laten zitten
- **Ruwheid:** vrij goed te zien. Als je het ziet is het teveel
- **TDE/TUE:** heel goed te zien, ook als het vrij weinig is
- **Zones:** als je ze ziet in Ronchi, zijn ze al vrij groot. Eigenlijk zijn alleen vrij scherpe overgangen goed te zien

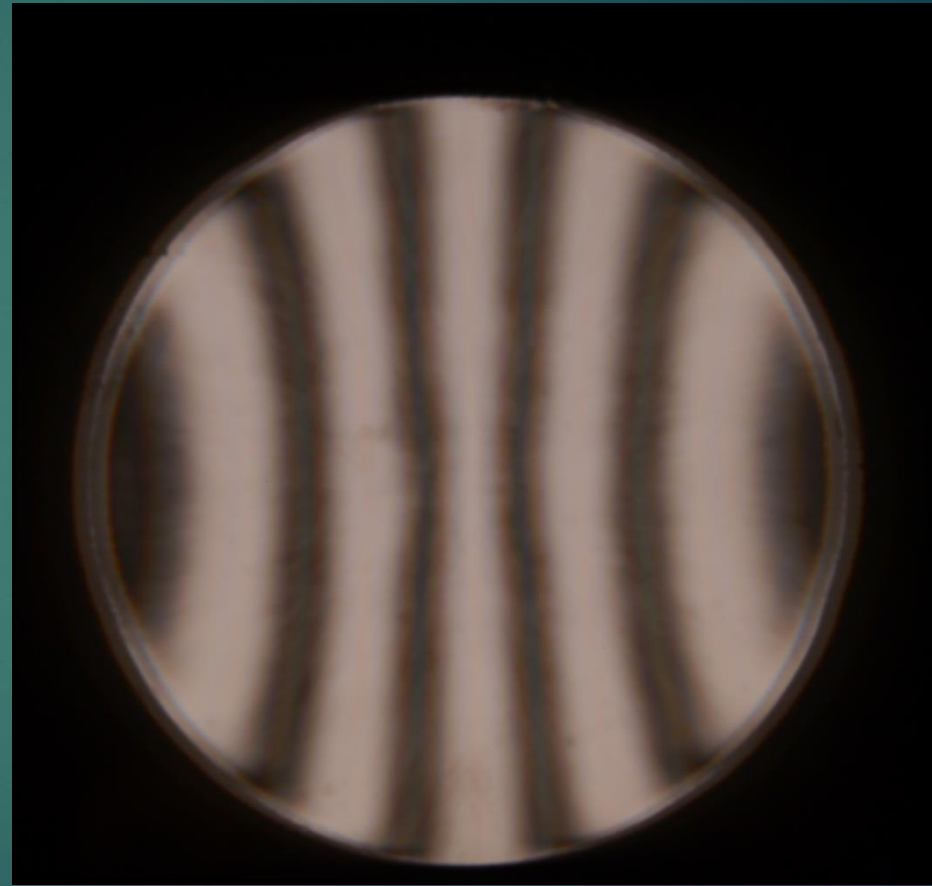
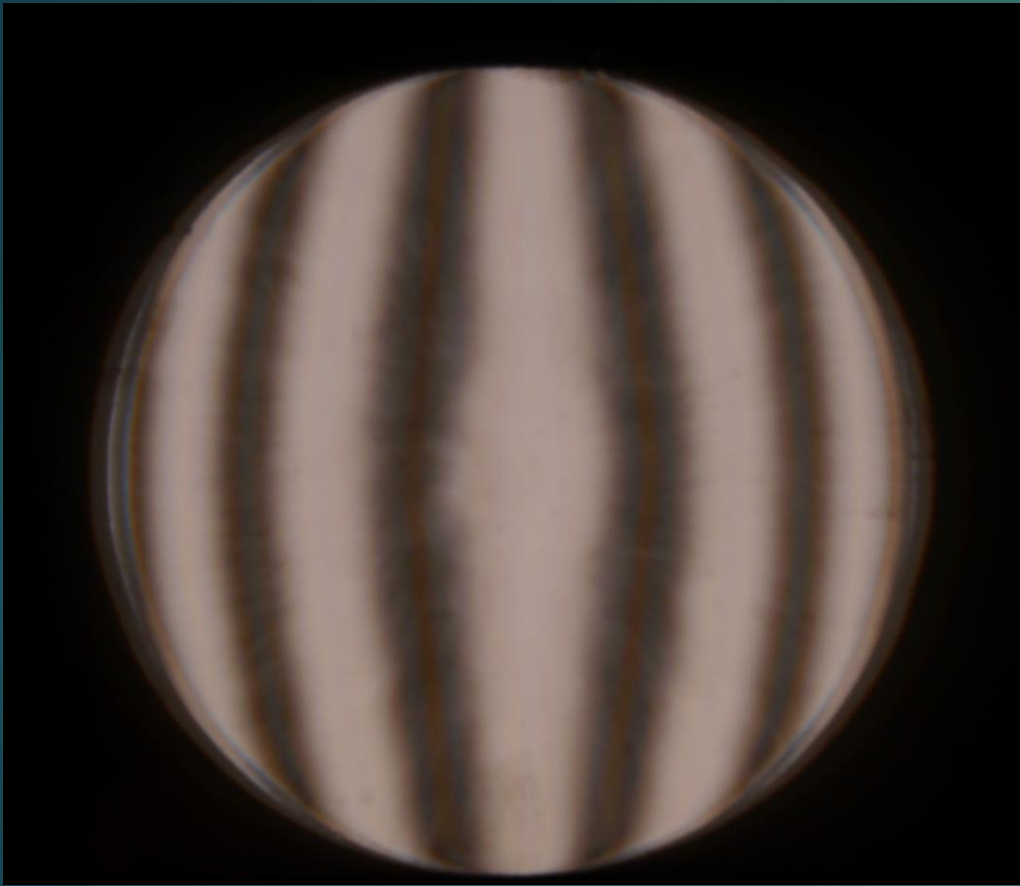


# Ronchitest: $\frac{1}{2}$ lambda P-V astigmatisme



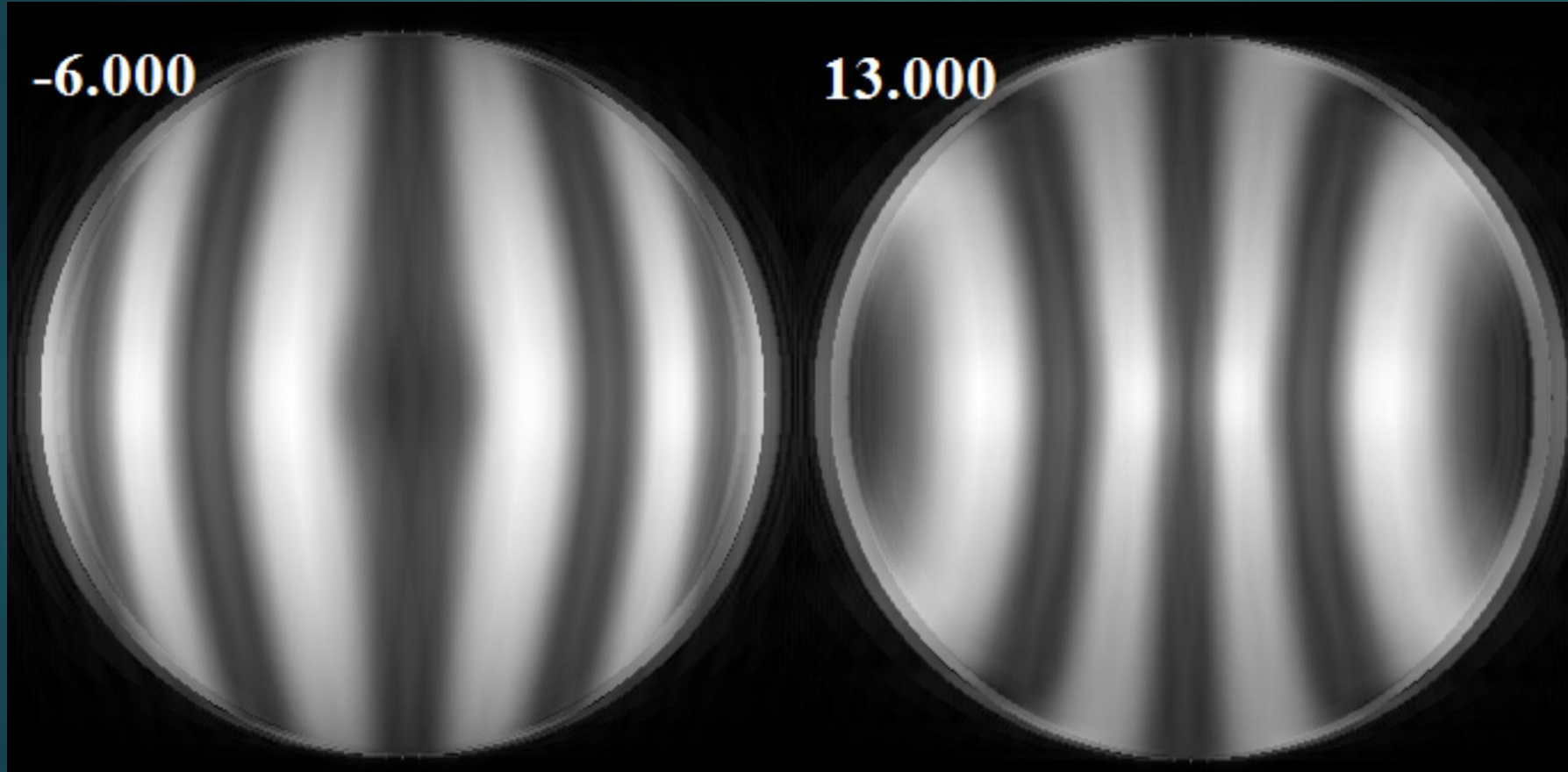
200 mm f/5 spiegel

# Ronchitest: $\frac{1}{2}$ lambda P-V astigmatisme



Zelfde spiegel als simulatie vorige dia

# Ronchitest: $1/4$ lambda P-V astigmatisme



# Ronchitest: ruw oppervlak



Zeer ruw

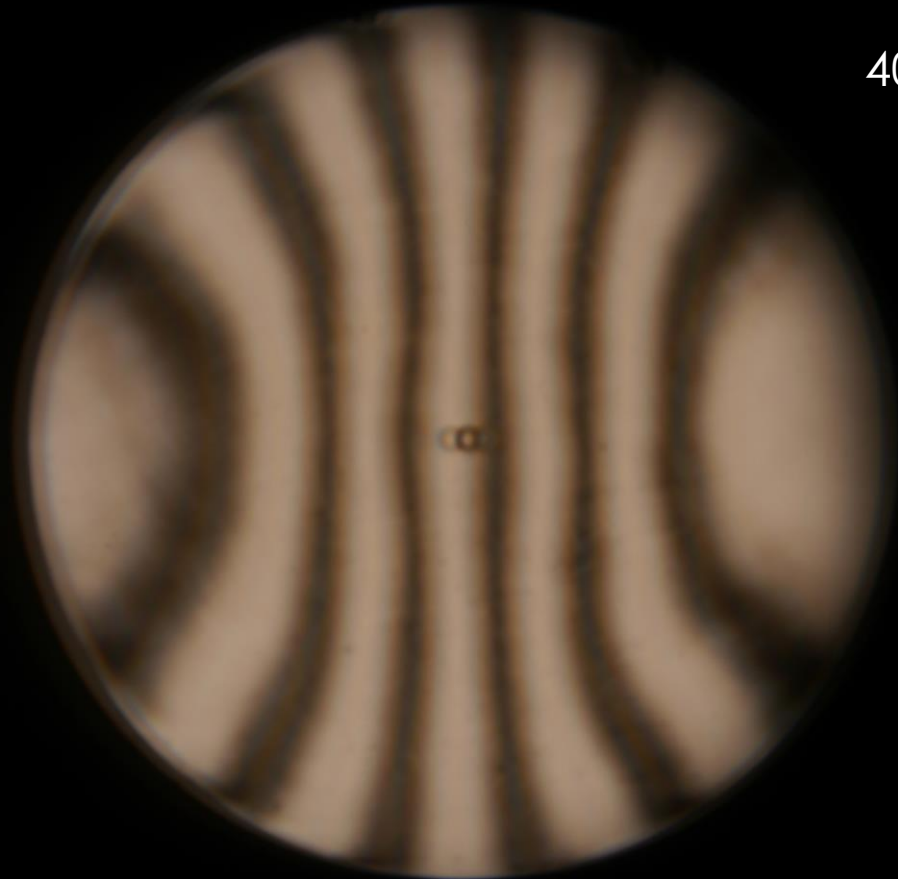


letsje ruw

# Ronchitest: Turned down edge (TDE)

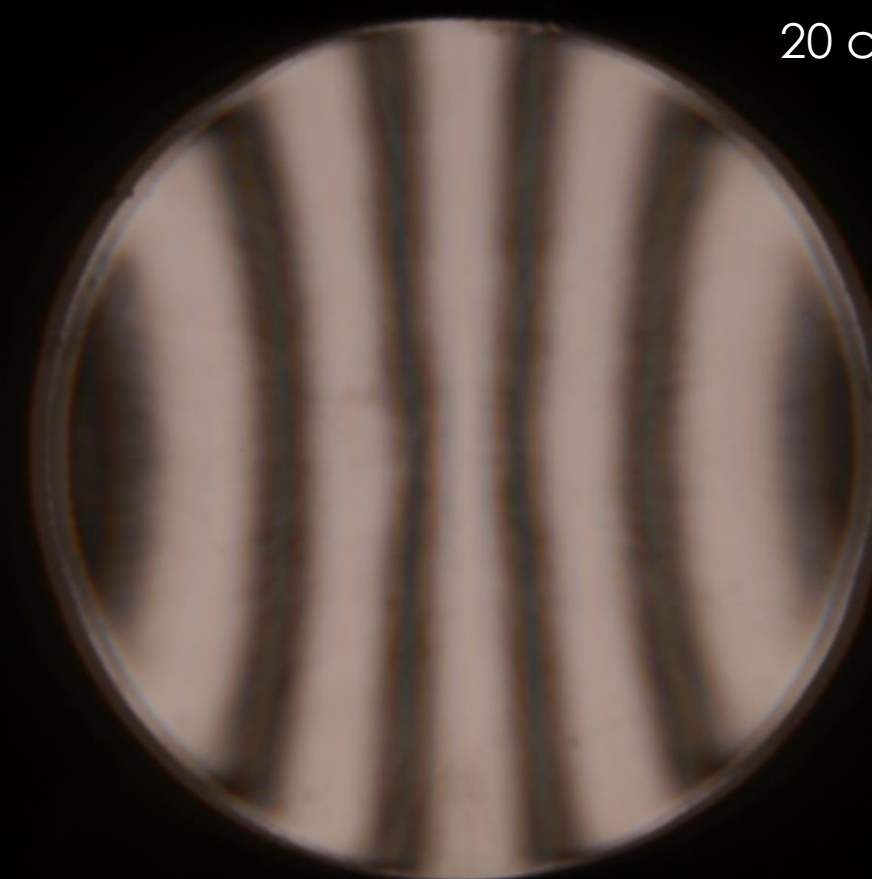
Veel TDE

40 cm



Matige TDE (dus niet weinig)

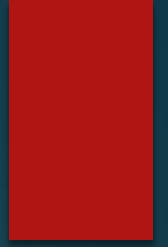
20 cm



Wanneer is er weinig TDE? Als je echt moeite moet doen om de haakjes te kunnen zien



# Conclusies Ronchitest



## Sferische aberratie:

- Ongeschikt om mate van correctie mee te bepalen. Uitzondering: 'matching Ronchi test'
- Een 'glad' verloop van de Ronchilijnen betekent niet dat de parabool goed is, want alleen vrij scherpe zoneovergangen zijn goed te zien

## Astigmatisme:

- als je het kunt zien is het teveel

## TDE:

- als je het met veel moeite maar net kunt zien, zou je het kunnen tolereren
- Rand afdekken als je het niet weg wilt (laten) halen

# De Foucaulttest

## Kwalitatief:

- Ruwheid
- TDE/TUE
- Astigmatisme

## Kwantitatief:

- Sferische aberratie

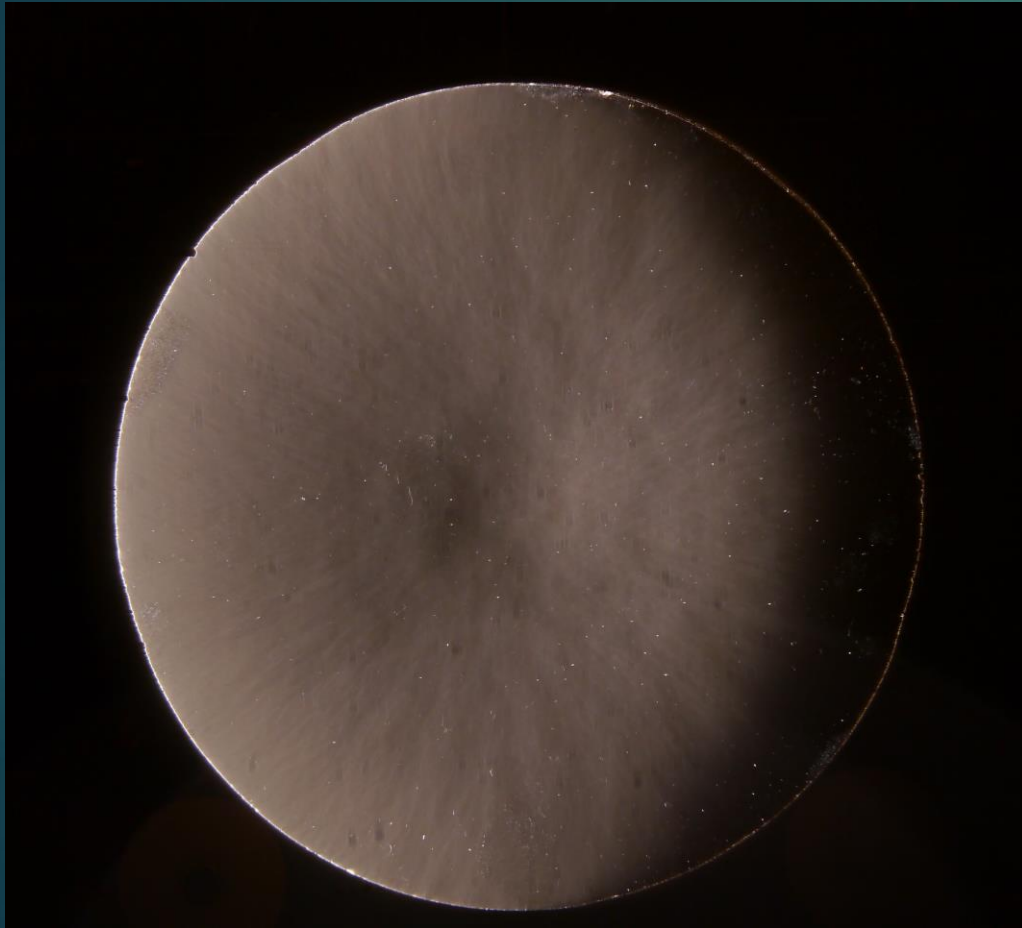
# Foucaulttest kwalitatief: ruwheid 1

De Foucaulttest is heel gevoelig voor ruwheid

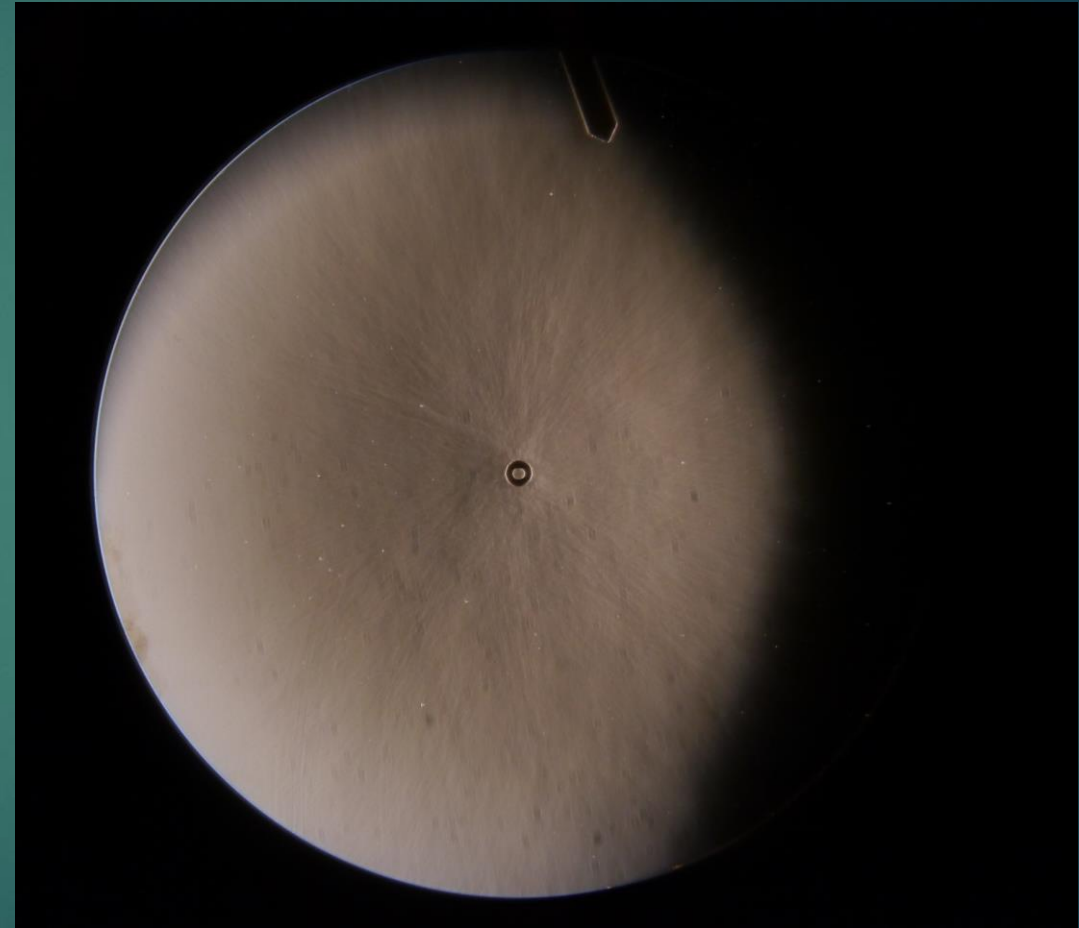
- Als het zonder moeite in de Foucaulttest (zonder masker) te zien is, is het te veel.
- Soms denken mensen ten onrechte 'omgekeerd':  
omdat de Foucaulttest gevoeligheid is voor ruwheid, stelt het waarschijnlijk niet veel voor als je het zien.



# Foucaulttest kwalitatief: ruwheid 2

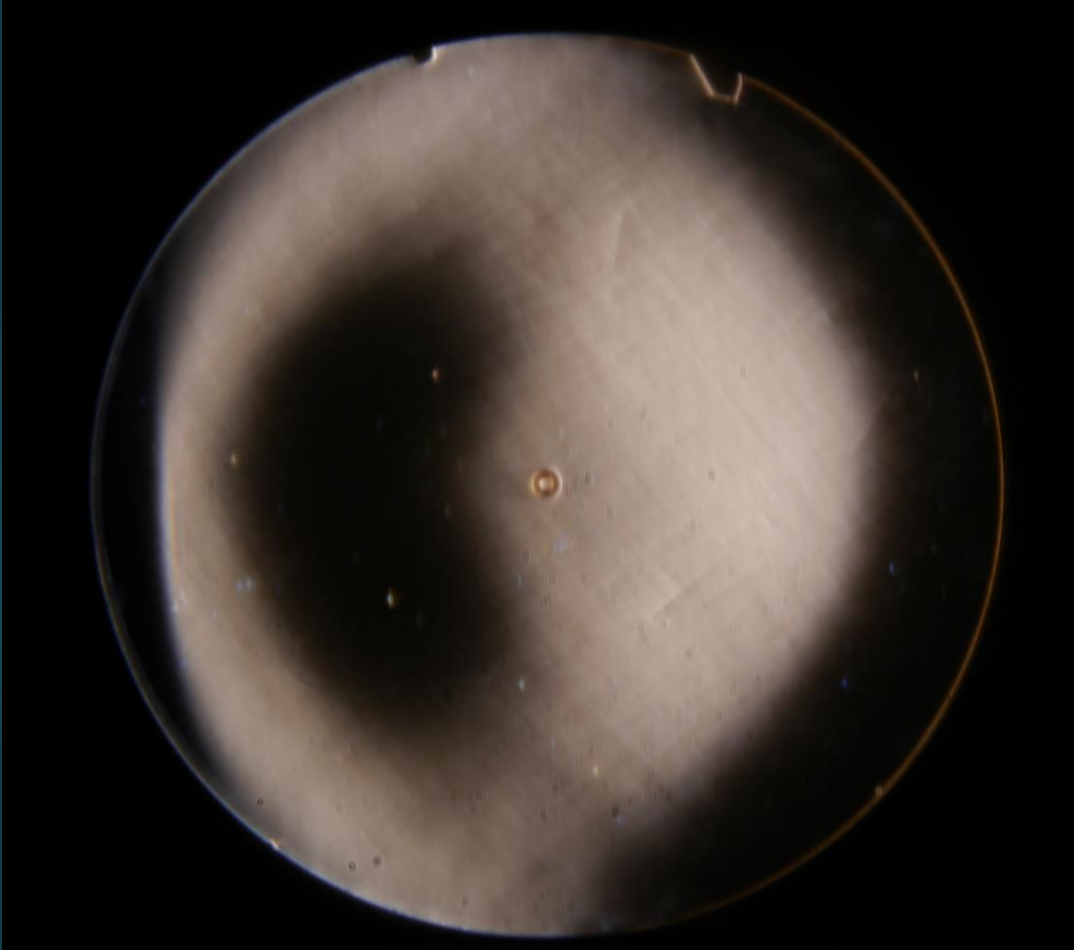


20 cm: zeer ruw

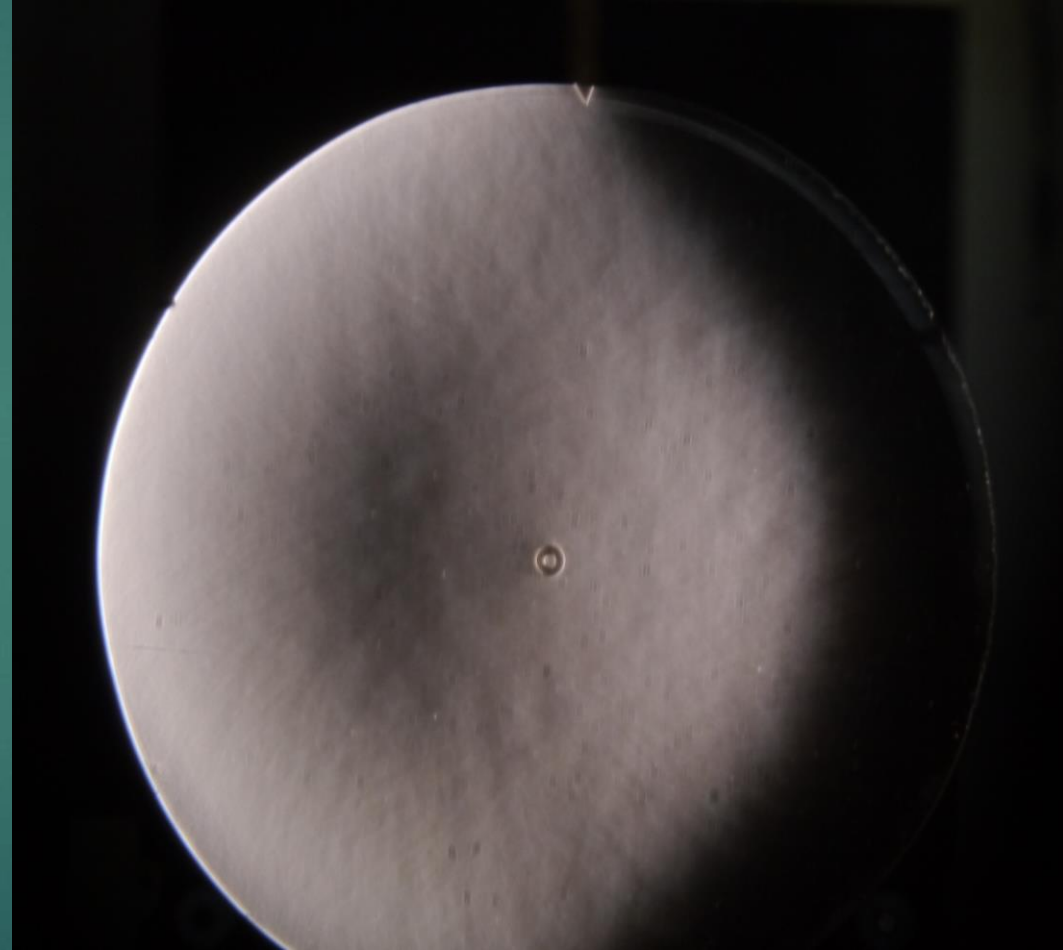


40 cm: zeer ruw

# Foucaulttest kwalitatief: ruwheid 3

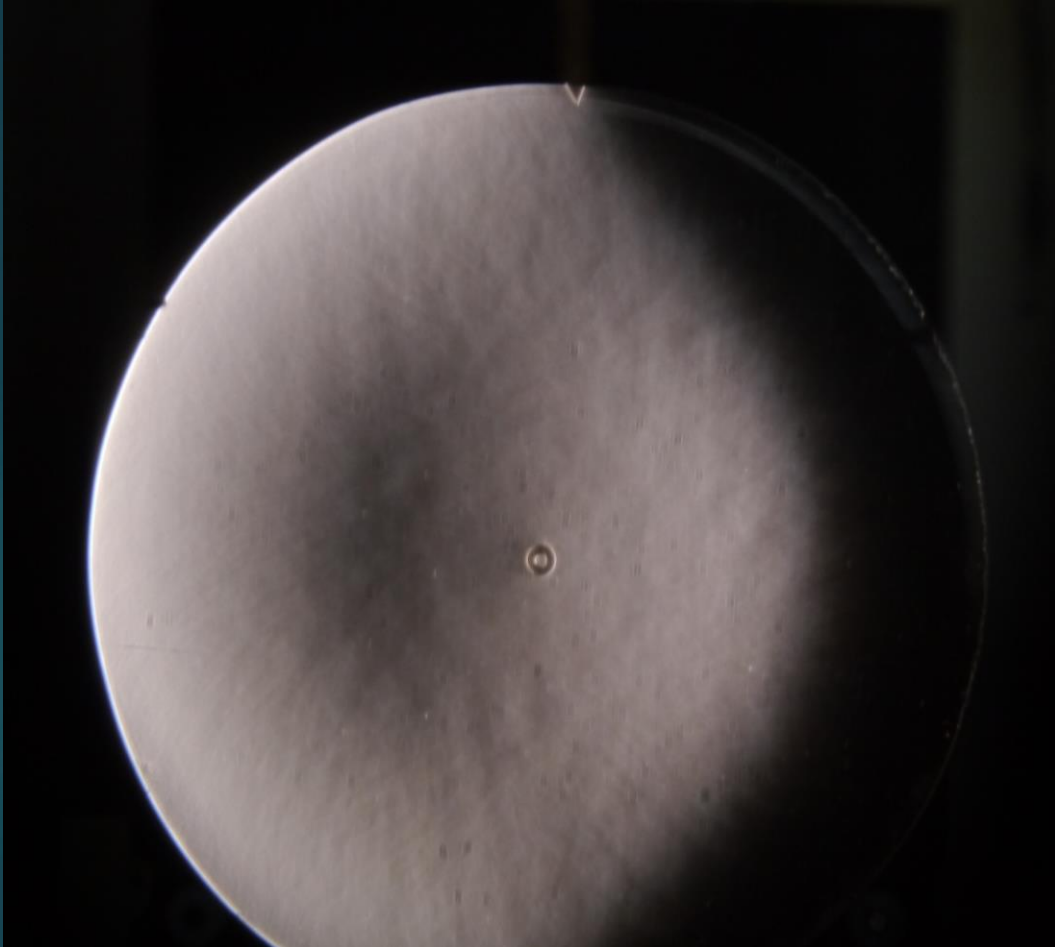


40 cm: zeer ruw

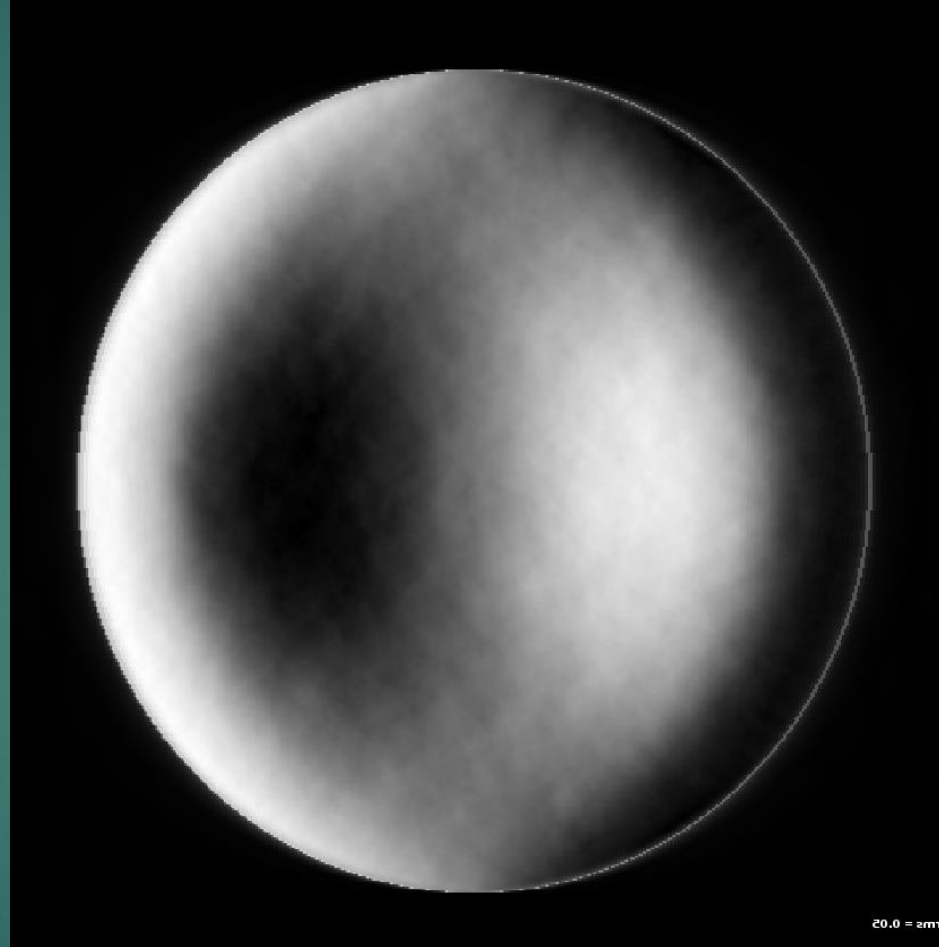


40 cm: zeer ruw

# Foucaulttest kwalitatief: ruwheid 4

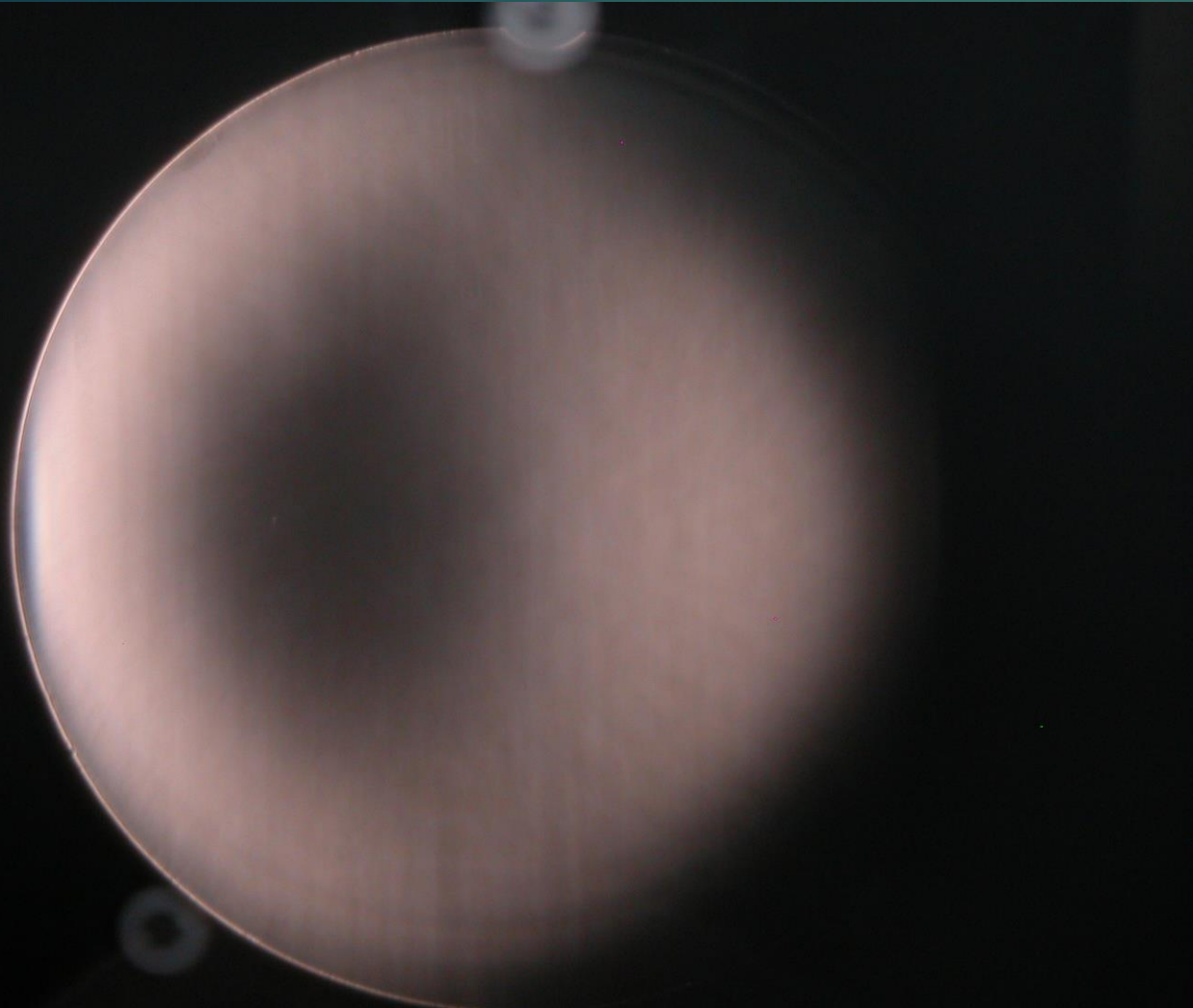


Zeer ruw



Ruwheid (simulatie)  $1/20 \lambda$  RMS

# Foucaulttest kwalitatief: ruwheid 5



30 cm: iets ruw (grensgeval)



Ruwheid (simulatie) 1/33 RMS

# Foucaulttest kwalitatief: TDE 1



Ernstige TDE

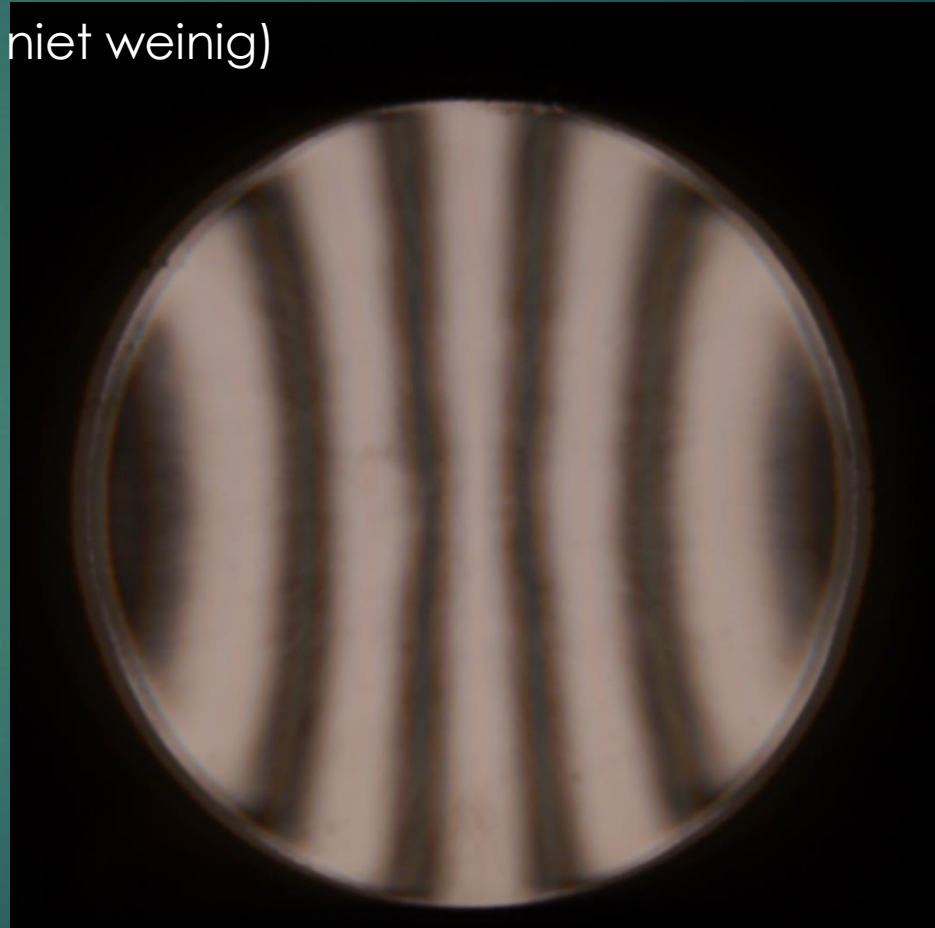
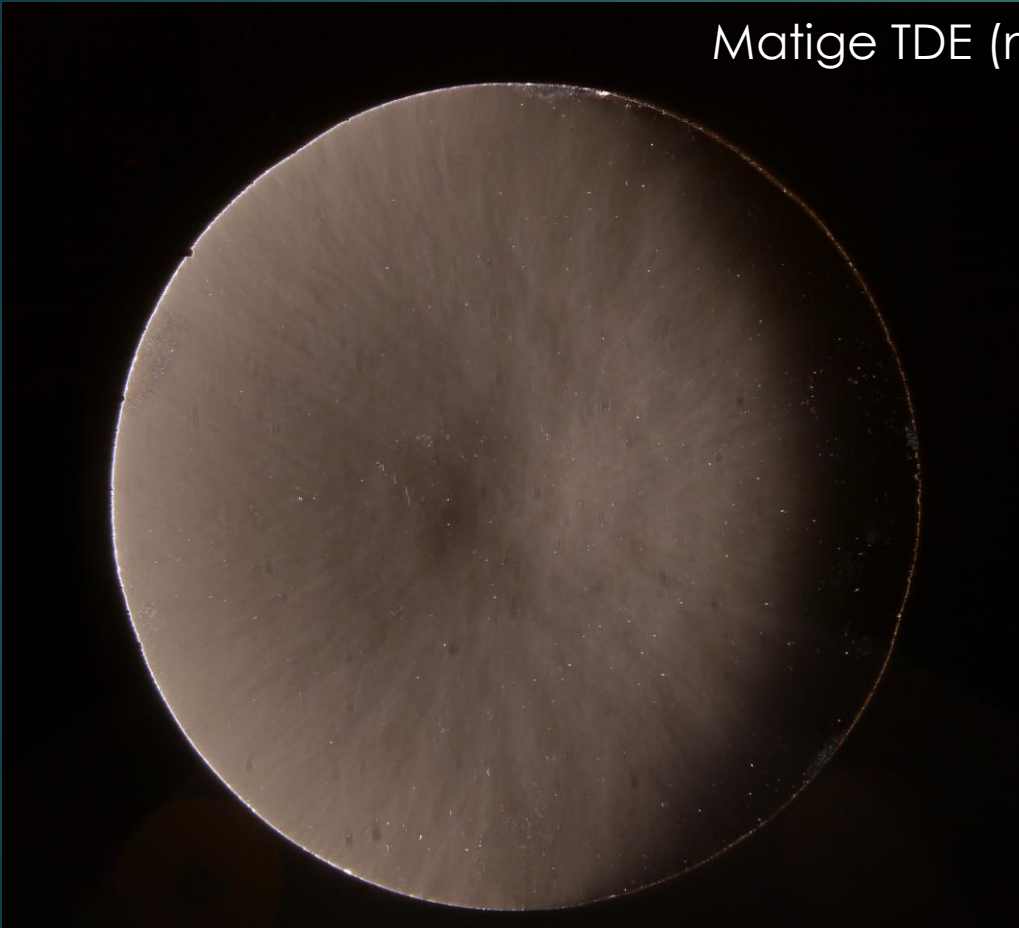


Geen TDE



# Foucaulttest kwalitatief: TDE 2

Matige TDE (maar niet weinig)



Wanneer is er weinig TDE? Als je het helderheidsverschil in de diffractierand maar net kunt zien

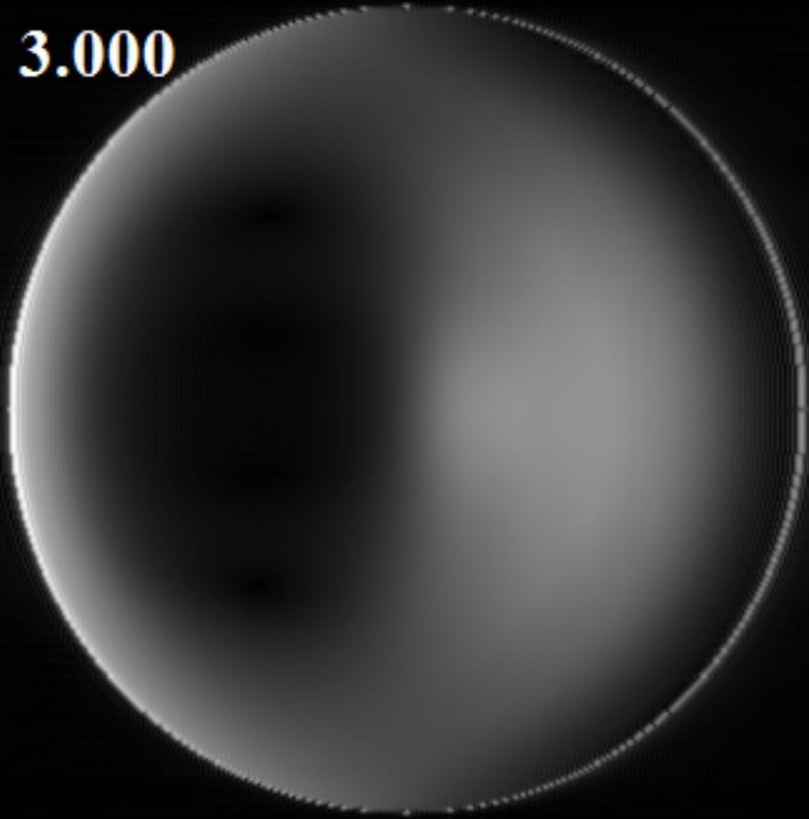
# Foucaulttest kwalitatief: astigmatisme 1

- Artikel Linfoot (1945) zegt dat  $1/20-1/40 \lambda$  te zien is.
- Is voor de praktijk nogal optimistisch
- Astigmatisme uit zich in a-symetrische lichtverdeling in het Foucaultbeeld (zonder masker)

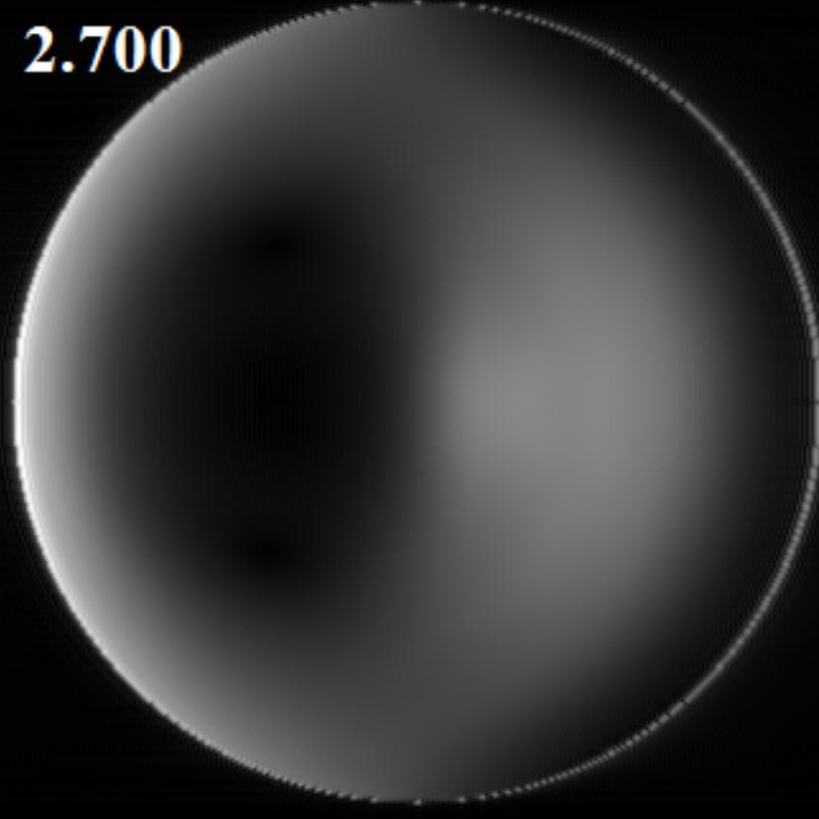
# Foucaulttest kwalitatief: astigmatisme 2



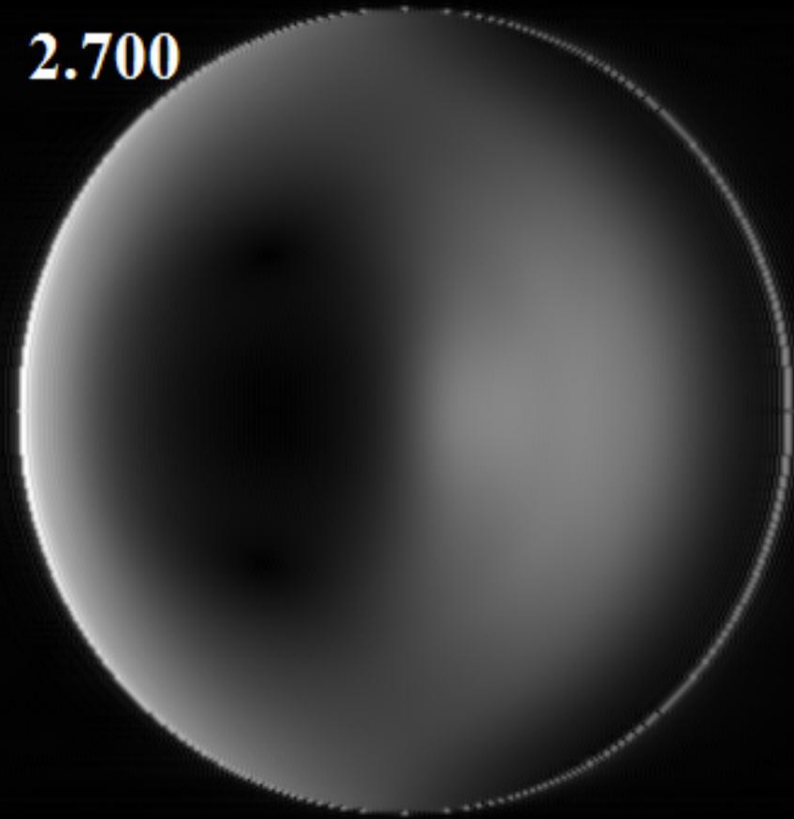
3.000



2.700



2.700



$1/2 \lambda$  astigmatisme

$1/4 \lambda$  astigmatisme

$1/6 \lambda$  astigmatisme



# Conclusies kwalitatieve Foucaulttest

## Ruwheid:

- zie je het (vrij) gemakkelijk, is het te veel
- zie je het met moeite is het te tolereren

## TDE/TUE:

- als je de diffractierand maar aan een kant ziet is het veel teveel
- zie je wel aan weerszijden de diffractierand, maar met duidelijk zichtbaar verschil in intensiteit, is het teveel
- Zie je met moeite verschil in intensiteit, is het acceptabel

## Astigmatisme

- Als je het kunt zien, al is het met moeite, is het te veel

# Foucaulttest kwantitatief: sferische aberratie

- Is wel kwantitatief, maar ook **subjectief**
- Hier wordt de Foucaulttest voornamelijk voor gebruikt
- Berekend wordt gewoonlijk de Peak-to-Valley (P-V) fout
- Een 'diffraction limited' spiegel heeft een P-V wavefront fout van max.  $1/4 \lambda$
- Een goede spiegel een P-V fout van max.  $1/8 \lambda$
- Aangenomen dat er **geen andere fouten** zijn dan sferische aberratie
- Programma's berekenen ook rms-fout en Strehlratio, maar hiervoor wordt eigenlijk op te weinig punten gemeten.

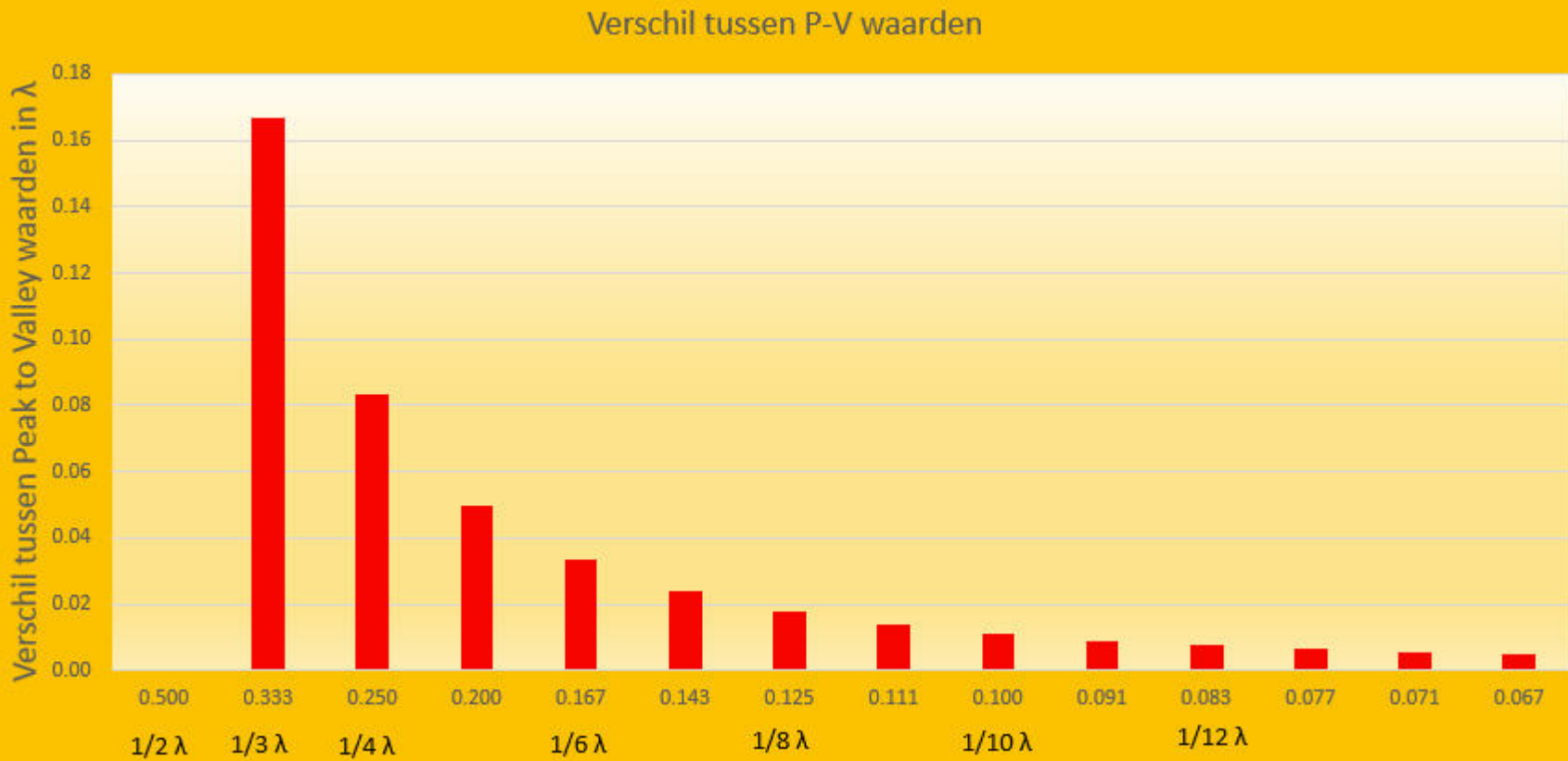
# Zwakke kanten van kwantitatieve Foucaulttest

- Subjectief helderheden van schaduwen vergelijken
- Vooral bij spiegels met lage F/D-waarde zijn de buitenste zones erg moeilijk te lezen en zijn de toleranties nauw
- Niet kritisch genoeg zijn als tester

Kun je de correctie van sferische aberratie ook kwalitatief (redelijk) goed inschatten?

- Nee dat kan niet

# Nauwkeurigheid P-V metingen



- Naargelang de vormnauwkeurigheid groter wordt, wordt het verschil kleiner
- Vanaf  $1/8 \lambda$  wordt het verschil erg klein en minder relevant
- Je zit dan – bij alleen s.a. – tussen 0.95 en 1.0 Strehlratio
- Tussen  $1/15$  en  $1/8 \lambda$  zit net zoveel als tussen  $1/8$  en  $1/5.5 \lambda$

# Goede spiegels met Foucaulttest?

Vaak voorkomend met spiegels, gemaakt met Foucaulttest:

Kwantitatief sferische aberratie tussen  $1/4$  en  $1/8 \lambda$  P-V

- In Foucault en of Ronchi zichtbaar astigmatisme
- In Foucault duidelijk zichtbare ruwheid
- In Ronchi en Foucault zichtbare afgevallen rand

Zo'n spiegel is in werkelijkheid dus niet goed maar matig of slecht ondanks de eventuele  $1/8 \lambda$  s.a.

Helaas worden de drie kwalitatieve aspecten vaak niet (serieus) bekeken of niet meegewogen en/of 'vergoelijkt' (valt wel mee, ietsje ruw, beetje astigmatisme, etc.)

# Conclusies Foucaulttest?

Je kunt goede spiegels maken met de Foucaulttest, als je:

- Heel kritisch bent met testen
- Onthoudt dat de spiegel zo goed als altijd minder goed is dan de kwantitatieve testuitslag suggereert
- Niet stopt bij  $1/8 \lambda$  als je een goede spiegel wilt, maar
- Doorgaat tot  $1/15 \lambda$ , of beter
- En zorgt dat er geen andere fouten zijn (astigmatisme, ruwheid, TDE)

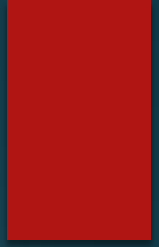
# Kwalitatieve test: de stertest 1

- Heel gevoelige test
- Niet makkelijk om goed uit te voeren vanwege seeing
- Binnenshuis met kunstster wat makkelijker (maar niet voor alle aberraties geschikt)
- Alle bekende afwijkingen zijn in een stertest te zien, maar niet allemaal even gemakkelijk te interpreteren

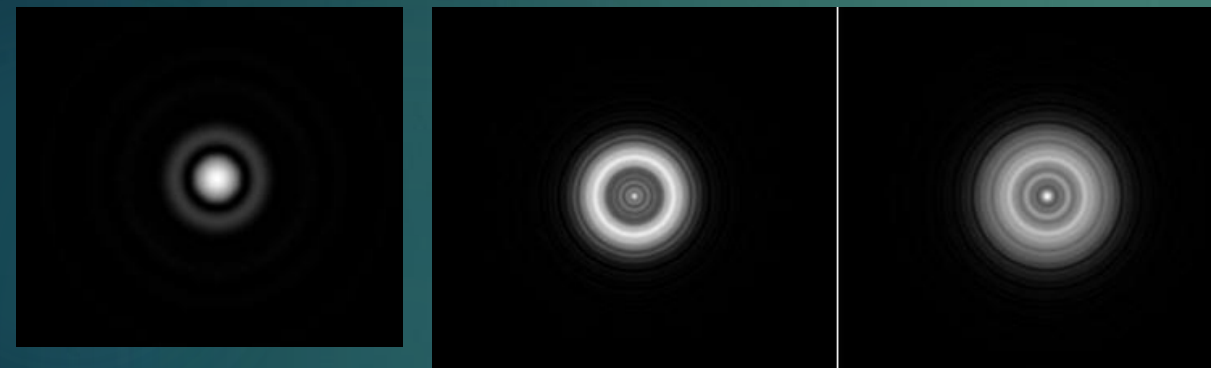


# De stertest 2: sferische aberratie

Uit focus simulaties 2.5 waves binnen/buiten focus



$1/4 \lambda$  sferische aberratie



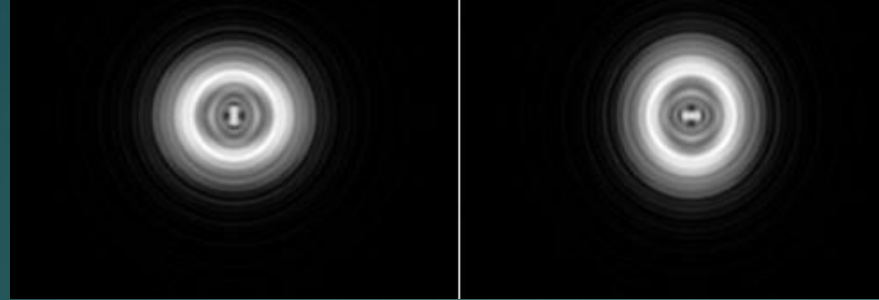
$1/8 \lambda$  sferische aberratie

- In focus niet te zien of er s.a. is als je niet kunt vergelijken met beeld zonder s.a.
- Buiten focus wel te zien, maar zonder vergelijking lastig te interpreteren

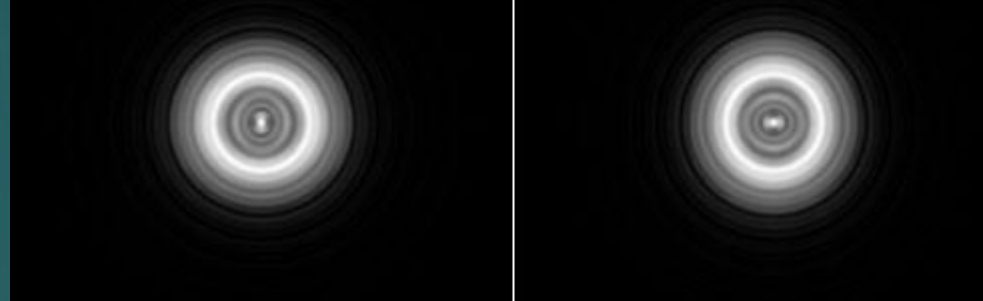


# De stertest 3: astigmatisme

0.37  $\lambda$  astigmatisme



0.18  $\lambda$  astigmatisme



0.143  $\lambda$  astigmatisme

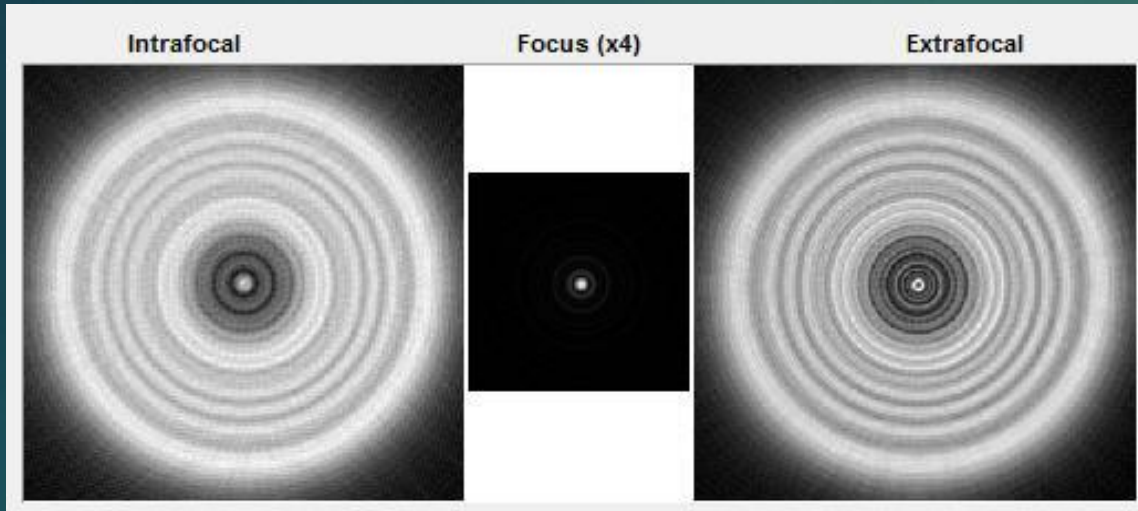


## Astigmatisme:

- Bij 0.37  $\lambda$  zowel in als buiten focus goed te zien (Strehlratio -20%).
- Bij 0.18  $\lambda$  in focus redelijk goed te zien, buiten focus goed te zien (Strehlratio -5%)
- 1/7  $\lambda$  in focus niet te zien, uit focus nog wel te zien (Strehlratio -3%)
- Grens voor zichtbaarheid ligt bij ongeveer 1/10  $\lambda$  (Strehlratio -2%).

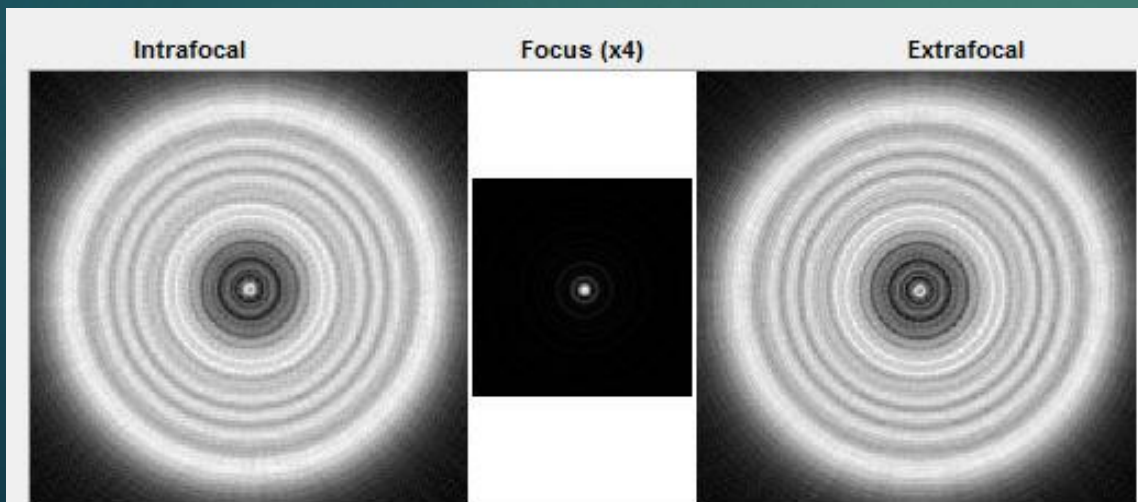
# De stertest 4:TDE

TDE 3 mm = 4% oppervlak 30 cm spiegel



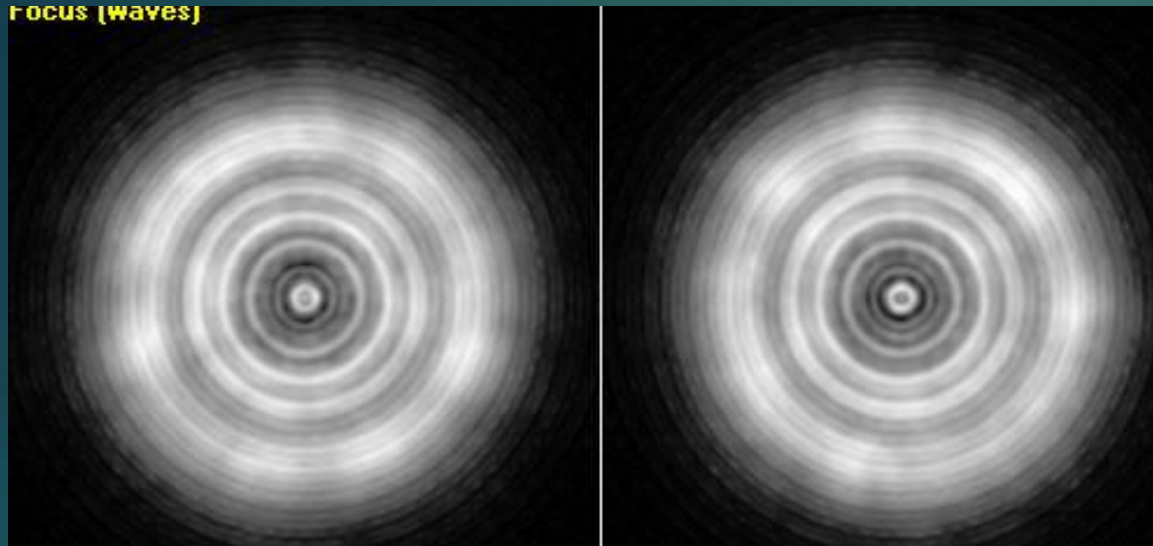
- Ringen duidelijker afgetekend buiten dan binnen focus
- 'harig' aan de rand van intrafociaal beeld
- Een klein afgefallen randje is al te zien in de stertest

TDE 1.5 mm = 2% oppervlak 30 cm spiegel

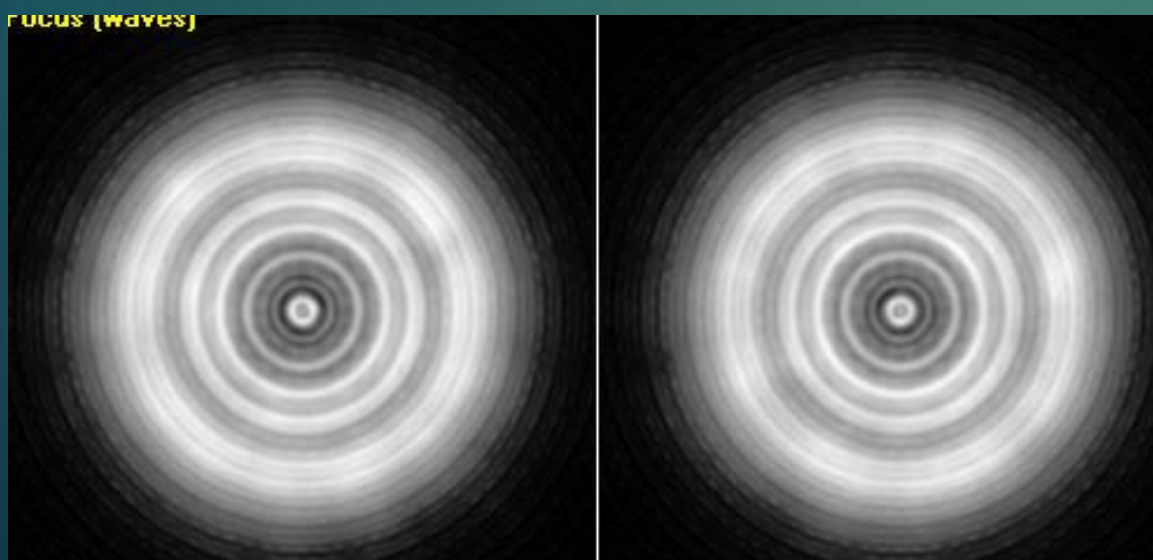


# De stertest 5: ruwheid

$1/20 \lambda$  RMS



$1/40 \lambda$  RMS



- Geeft een vlekkerige indruk
- Gemakkelijk te verwarren met turbulentie
- $1/20 \lambda$  RMS gemakkelijk te zien in stertest
- $1/40 \lambda$  RMS moeilijk te zien in stertest
- Volgens Suiter is  $1/20 \lambda$  net acceptabel echter: verlaagt Strehlratio met bijna 10%

# Conclusies stertest

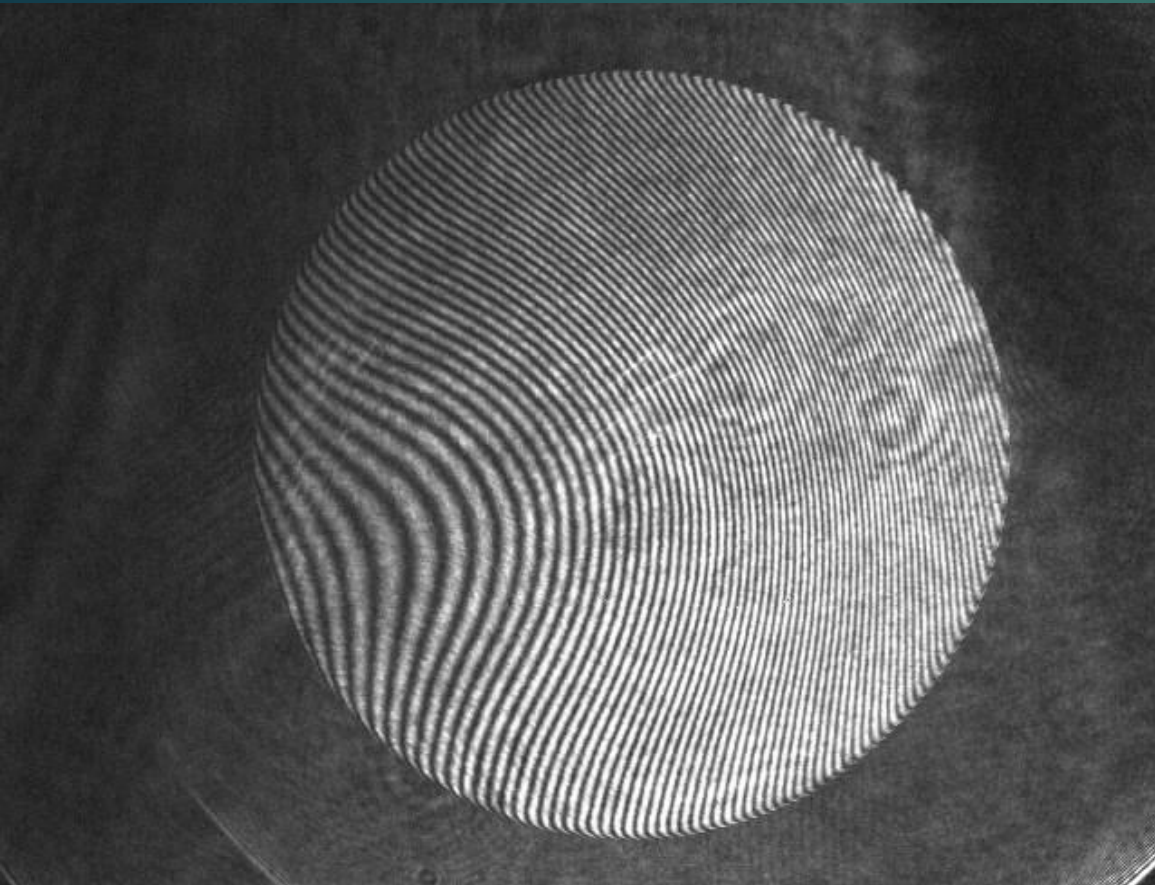
- ▶ Goede en gevoelige, kwalitatieve test
- ▶ Om een spiegel goed te kunnen beoordelen is veel ervaring nodig in het interpreteren van de uit focus sterbeeldjes
- ▶ Voor astigmatisme het gemakkelijkst te gebruiken
- ▶ Redeneer 'kleine' fouten niet te gemakkelijk weg  
Voorbeeld:  $1/28 \lambda$  RMS wavefront fout verlaagt de Strehlratio met 5%, maar als je er drie van hebt, heb je maar  $0.95^3 = 0.86$  Strehlratio over.

# De Interferometrische test: een kwantitatieve test

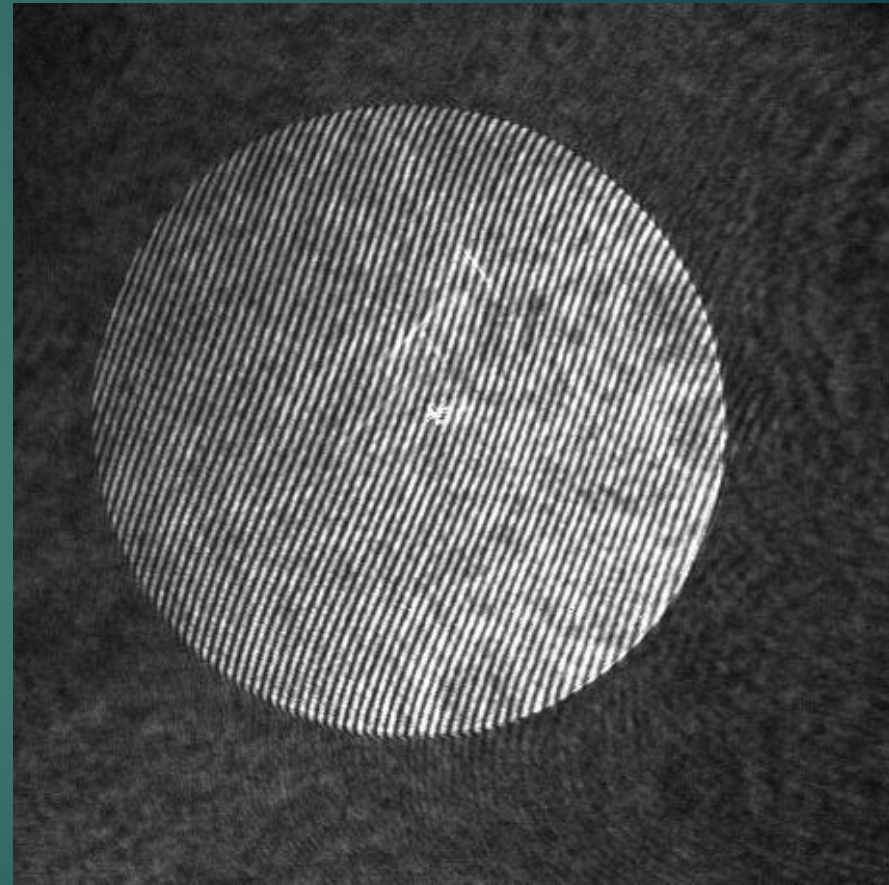
- Oorspronkelijk alleen gebruikt door professionals
- Nu ook steeds meer door amateurs: vooral de Bath interferometer
- Meest objectieve en kwantitatieve van hier behandelde
  
- Hoe werkt deze test:
- Net als Foucaulttest nabij het COC
- Je maakt een foto van een interferogram en analyseert de interferogrammen met software.



# De interferometrische test 2



Interferogram 20 cm f/3.8



Interferogram 20 cm f/6

# Bath interferometer 1

- Test alle relevante vormfouten kwantitatief (Zernike coëfficiënten)
- Gevoelig voor trillingen en turbulentie
- Beide goed onder controle te houden

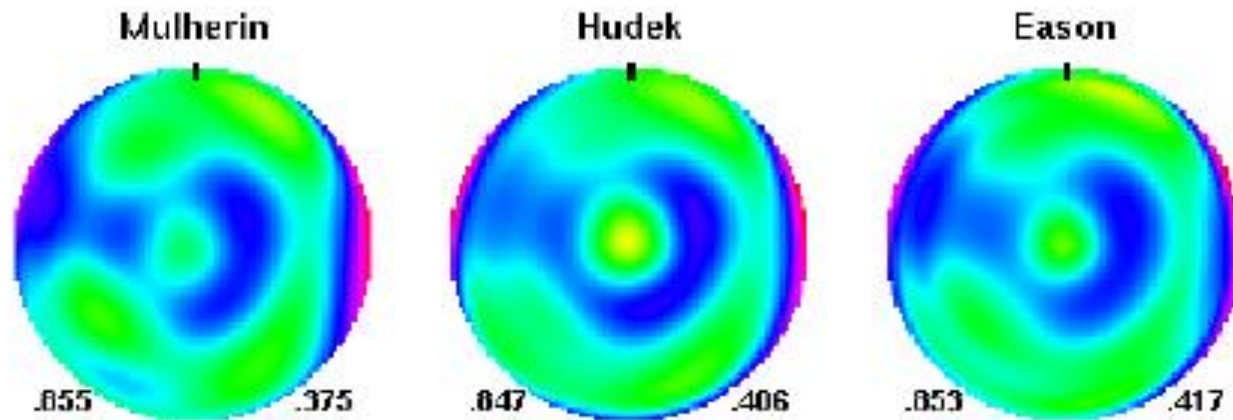
Voor goed eindresultaat:

- Spiegel roteren over vier posities: 0, 90, 180 en 270° en per positie een aantal interferogrammen (5-12 per positie)
- Wavefronts van interferogrammen per positie middelen
- Wavefronts van vier posities middelen tot totaal wavefront

# Bath interferometer 2

Veel onderzoek gedaan naar mate van overeenkomst met andere typen interferometers, bijvoorbeeld 'Milligan onderzoek'.

Figure 9: Final Adjusted Results



Optical mechanics

Galaxy Optics

Amateur

Gaven alle drie  
Een goed vergelijkbaar  
resultaat met betrekking

- P-V-error
- Strehl ratio
- Astigmatisme



# Bath interferometer 3

Zeer geschikt voor:

- Berekenen sferische aberratie
- Berekenen astigmatisme. Vooral hiervoor zijn de eerder genoemde rotaties van belang
- Berekent ook hogere orde afwijkingen

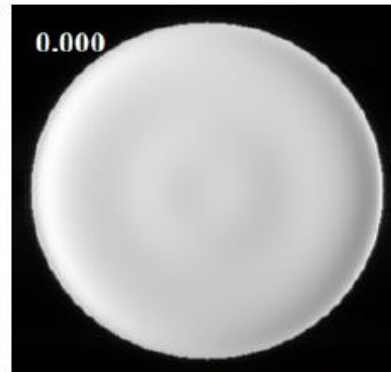
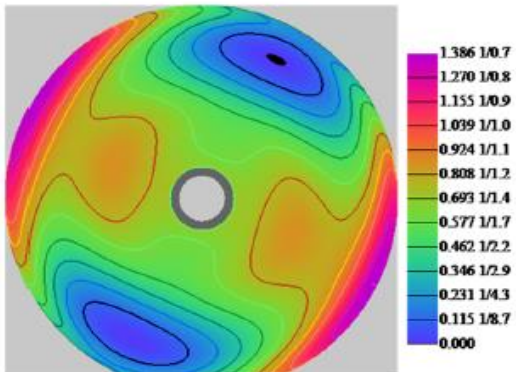
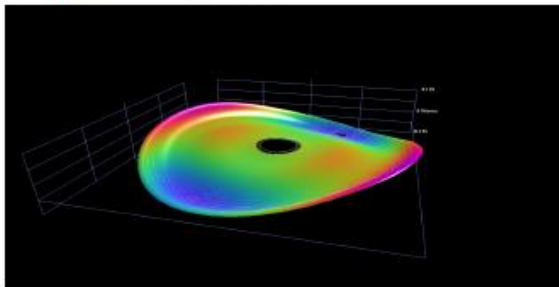
Minder geschikt (maar kan wel) voor:

- Bepalen mate van ruwheid
- Bepalen kwaliteit van de rand (TDE/TUE)

# Bath interferometer 4 (output)

Wavefront error in Waves at 550nm RMS: 0.293 Strehl: 0.033  
Best Conic=-0.806 Desired Conic: -1.00  
Artificial Null: 0.985  
Igram Wavelength: 650.0nm  
Diameter: 303.00 mm  
ROC 3249.00 mm

	Wyant	RMS			
Piston	-0.002	0.003	Disabled	Y 2nd Astig	0.015 0.005
X Tilt	-0.000	0.000	Disabled	X 2nd Coma	-0.009 0.003
Y Tilt	0.000	0.000	Disabled	Y 2nd Coma	-0.002 0.001
Defocus	0.007	0.005	Disabled	2nd Spherical	0.094 0.042
X Astig	0.333	0.161		X Tetrafoil	0.015 0.006
Y Astig	-0.442	0.213		Y Tetrafoil	0.014 0.005
X Coma	-0.100	0.042	Disabled	2nd X Trefoil	0.009 0.003
Y Coma	-0.033	0.014	Disabled	2nd Y Trefoil	0.000 0.000
Spherical	0.191	0.101		3rd X Astig	0.012 0.004
X Trefoil	0.014	0.006		3rd Y Astig	0.004 0.001
Y Trefoil	-0.014	0.006		3rd X Coma	0.003 0.001
X 2nd Astig	-0.061	0.023		3rd Y Coma	-0.012 0.003



Simulated Auto Collimation Foucault.

- Output afhankelijk van gebruikte software (dit is OpenFringe)
- Geeft Zernike coëfficiënten met RMS-errors (doet alle software)
- Mogelijkheid om rapporten te maken voor afzonderlijke fouten (bijvoorbeeld astigmatisme)

# Samenvattend:

waar zijn de tests nu wel/niet geschikt voor als je kritisch wilt testen

	sferische aberratie	astigmatisme	ruwheid	rand
Ronchi	_*	-	+	+
Foucault	+	-	+	+
Stertest	_**	+	+	+
interferometer	+	+	+/-	+/-

\* Alleen met de 'matching Ronchitest'

\*\* Alleen met heel veel ervaring in ster testen

+/- Kan wel maar is lastig

# Conclusie

- Niet kritisch testen op **alle** relevante fouten levert slechte spiegels op, ook al staat er een mooi getal bij
- Alle tests hebben hun sterke en zwakke punten
- Interferometer is meest objectief en meest kwantitatief
- Het is lastig – zo niet onmogelijk – om met behulp van een enkele testmethode een spiegel goed in al zijn facetten te beoordelen

## combinatiemogelijkheden:

- ▶ Interferometer voor s.a en astigmatisme, plus Foucaulttest (en eventueel Ronchitest) voor ruwheid en rand.
- ▶ Foucaulttest voor s.a, ruwheid en rand, met stertest voor astigmatisme. Eventueel Ronchi als extra voor rand