

Justageempfindlichkeit, Retrace - Effekte und Restfehler bei Fizeau - Kondensoren

Poster P34, 111. DGaO Jahrestagung, 25.-28. Mai 2010, Wetzlar
 DGaO-Proceedings 2010 - <http://www.dgao-proceedings.de/> - ISSN: 1614-8436

Joachim Wesner¹, Hans-Martin Heuck¹,
 Jan Heimann²

Leica Microsystems CMS GmbH
 Ernst-Leitz-Strasse 17-37
 D-35578 Wetzlar, Germany

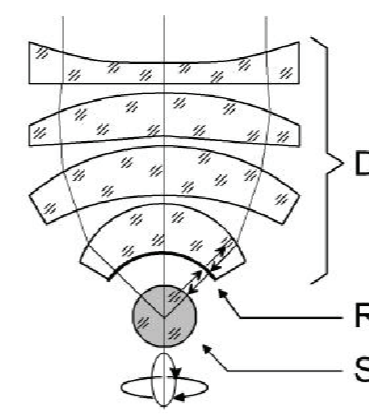
¹ Leica Microsystems
² Fachhochschule Gießen - Friedberg

Quantitative Charakterisierung der Fizeau - Sphäre mit dem Random Ball Test (RBT)

- Normalerweise dient die als perfekt angenommene Fizeau - Sphäre (R) als Referenz zur Messung des Prüfgegenstandes (S).
- Umgekehrt kann auch eine perfekte Kugel (schwarzes Glas wegen Rückseitenreflex) als Referenz zur Messung der Fizeau - Sphäre dienen.

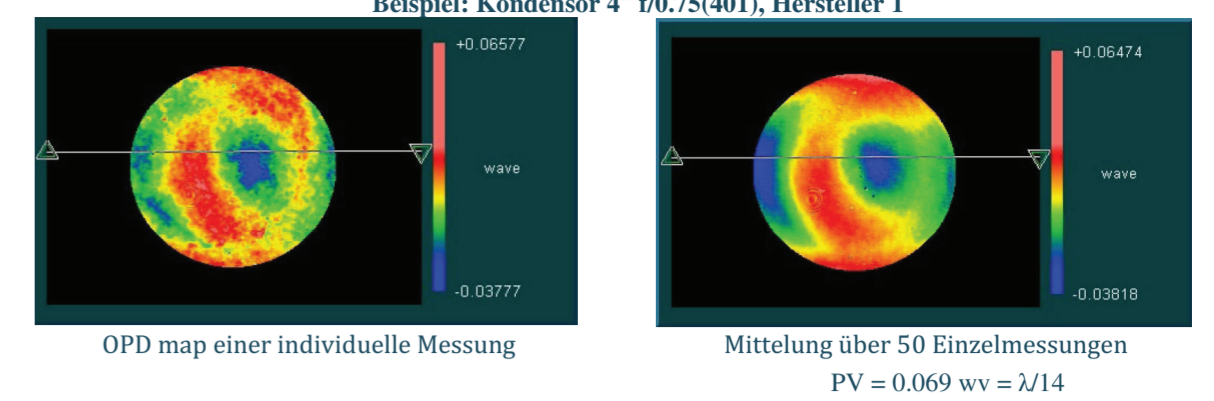
Der RBT (auch Ball Averaging genannt) ist ein selbst kalibrierendes Verfahren, das auf Messungen in verschiedenen Positionen beruht und Fehler einer nicht perfekten Kugel durch Mitteln eliminiert.

- Hierbei wird ein sphärischer Prüfgegenstand in mehreren zufälligen Orientierungen in seiner konfokalen Position gegen die Referenzfläche des Kondensators gemessen. Der Mittelwert der Einzelmessungen konvergiert gegen die von den Oberflächenfehlern der Kalibrierkugel unabhängigen systematischen Messabweichung des Systems.



Eine Einzelmessung W_i setzt sich zusammen aus $W_i = W_{ball,i} + W_{instrument}$.
 Werden die Messwerte gemittelt so ist der systematische Fehler des Interferometers $W_{instrument}$ \rightarrow $W_{Mittelwert} = \frac{\sum W_i}{N} = \frac{\sum W_{ball,i}}{N} + \frac{\sum W_{instrument}}{N}$
 $W_{ball,Mittelwert} = W_{messung} - W_{instrument}$

Systematischer Fehler eines High - NA Kondensors



- Messungen mit einem Kondensator hoher Apertur zeigen deutliche Abweichungen zwischen Einzelmessungen mit einer Kalibrierkugel guter Oberflächenqualität und durch Ball Averaging bestimmter Eichdaten. Die Fehler der Referenzfläche liegen hier bei 0.069 wv = lambda/14
- Bei erhöhten Anforderungen an die Messgenauigkeit ist daher eine absolute Kalibrierung der Fizeau - Sphäre mit einem geeigneten Verfahren notwendig.

Dezentrierung des Prüflings und Sensitivity Functions

- Ausrichtungsfehler erscheinen als Wellenfrontfehler höherer Ordnung (scheinbare Koma). Diese Fehler können mit Kenntnis der Steigung der Wellenfront abgeschätzt und kompensiert werden.

$$\Delta W_{gen} = S_x(x,y)\nabla_x M + S_y(x,y)\nabla_y M$$

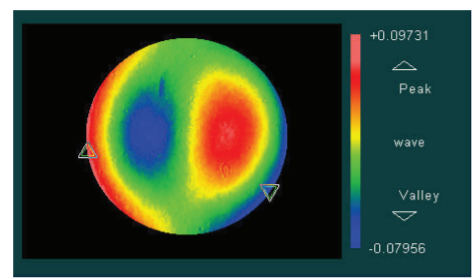
- Geometrischer Fehler setzt sich zusammen aus dem Gradienten der Wellenfront und den sogenannten Empfindlichkeitsfunktionen (Sensitivity Functions):

$$S_x(x,y) = \sum c_i \cdot Z_i(x,y)$$

$$S_y(x,y) = \sum c_i \cdot Z_i(x,y)$$

wobei c_i der zum Zernike Term Z_i korrespondierende Empfindlichkeitskoeffizient ist. SFs werden messtechnisch durch gezielte Verkipfung der Probe und jeweiligem Vergleich mit einem Nulltest bestimmt.

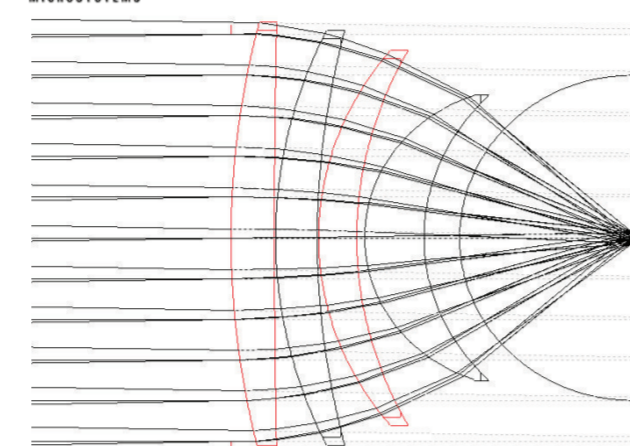
Dezentrierung des Prüflings verursacht eine weitgehend lineare Variation der Koma, wobei andere Zernike Polynome nahezu unverändert bleiben.



Probenradius [mm]	Z ₁₁	Z ₁₃
2.6	-0.0054	0.0002
2.6	0.0059	0.0002
2.6	0.0001	0.0058
2.6	0.0001	-0.0053
10.4	-0.0063	0.0009
10.4	0.0057	0.0011
10.4	-0.0002	0.0070
10.4	-0.0007	-0.0050

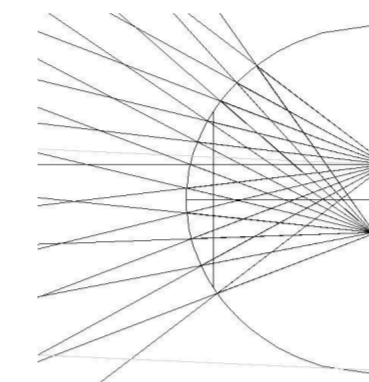
Beispiel: Kondensator 4'' f/0.65, Hersteller 1 (426). Auf Streifenzahl 1 normierte Koma bei lateraler Dezentrierung der Probe in x und y Richtung. Auftretende Koma ist bei gezielter Dezentrierung symmetrisch und weitgehend unabhängig vom Kugeldurchmesser.

Retrace Fehler bei dezentrierter Probe und endlicher Streifendichte



- Bei hinreichendem Durchmesser von Probekugel und aberrationsfreiem Kondensator kommt die rücklaufende Welle aus einer zur optischen Achse gespiegelten virtuellen Quelle.
- Retrace - Effekte ergeben sich dann nur durch Verkipfung der am Prüfling reflektierten Wellenfront gegen die Referenzwellenfront (Feldkoma) und treten nur bei endlicher Streifendichte auf.
- Dies ist nicht der Fall bei kleinen Probekugeln, die auch im Idealfall Aberrationen der reflektierten Wellenfront (OPD) des Kondensors wie auch Versatz und Shearing (Öffnungsfehler -> Koma) verursachen.

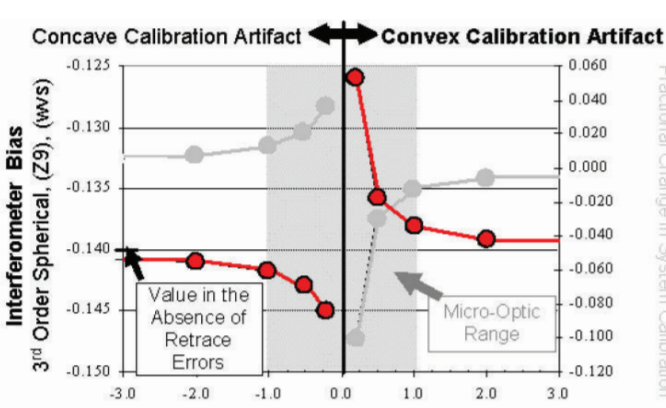
- Retrace Fehler haben ihre Ursache in unterschiedlichen optischen Wegstrecken (OPD) von Referenz- und Messwellenfront.
- Dann kann der Einfluss der sammelnden Optik im Kondensator nicht mehr als gering angesehen werden.



Cavity - Fehler

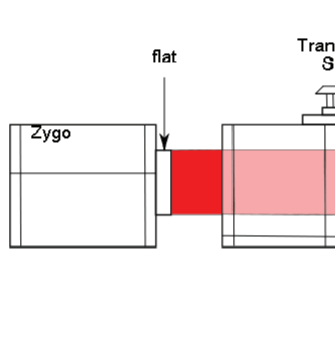
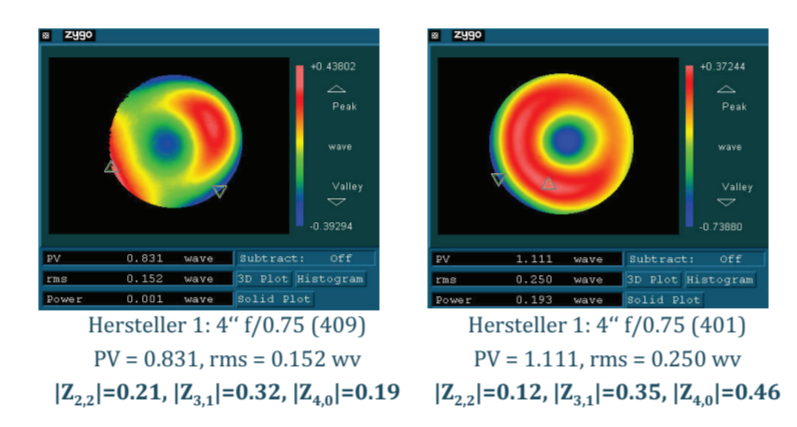
Der Cavity Fehler bezeichnet eine spezielle Art von Retrace-Effekt, der auch bei Streifendichte Null auftritt und der annähernd proportional zum Radienverhältnis des Prüflings zur Referenzfläche ist.

- Als „Cavity“ bezeichnet man die Gesamtheit der zu messenden Oberfläche und der als Referenzfläche dienenden Austrittsfläche des Fizeau - Kondensors.
- Wird das Radienverhältnis extrem, erreicht der Messfehler hohe Werte. Ist der Radius des Prüflings sehr groß, konvergiert der Restfehler gegen einen Grenzwert, der durch die transmittierte Wellenfront und die Referenzfläche gegeben ist.
- Ändert sich das Vorzeichen des Krümmungsradius, so ändert sich auch das Vorzeichen der Aberration.



Quelle: NEILL WILLIAM GARDNER: Precision geometric metrology of refractive micro-lenses. Charlotte, NC, 2007.

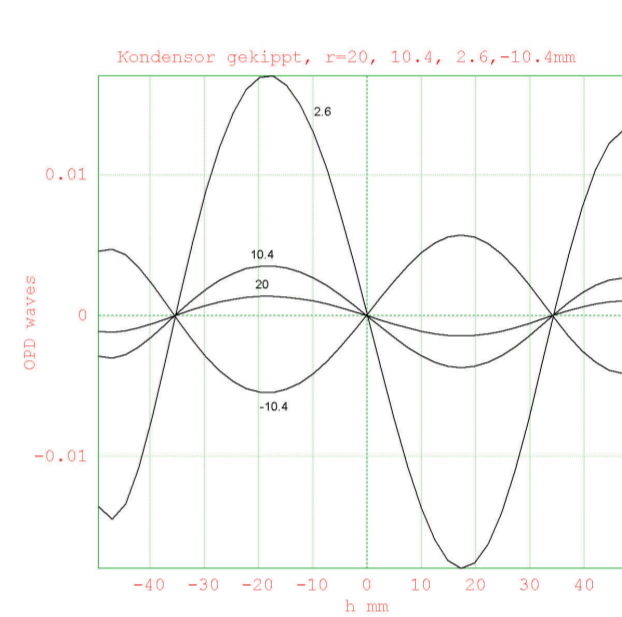
Messung der transmittierten Wellenfront von Fizeau-Kondensoren



- Es besteht eine Wechselwirkung zwischen der nicht idealen Wellenfront des Kondensors und dem Radienverhältnis der verwendeten Kalibrierkugel.
- Um die transmittierten Wellenfronten der verschiedenen Fizeau-Kondensoren zu quantifizieren, wurde die jeweils von der eingebauten Referenzfläche zurückkehrende Wellenfront gegen eine plane Fläche (Transmission Flat) gemessen. Die geringen Fehler der Referenzfläche können dabei vernachlässigt werden.
- Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen baugleichen Kondensoren.

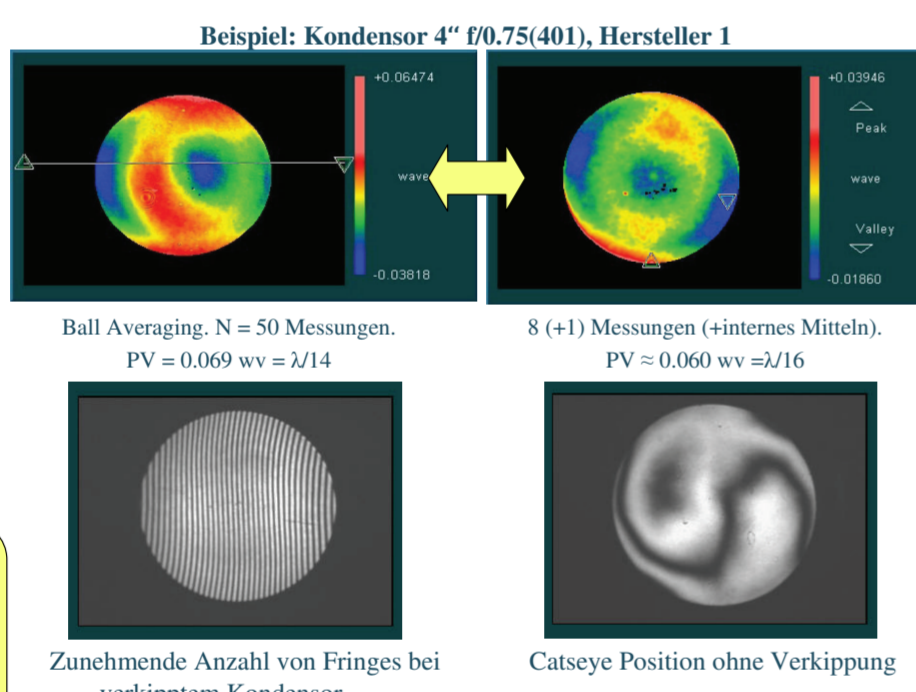
Retrace - Fehler trotz Streifendichte Null

- Sind Referenzfläche und Prüfling gleichzeitig dezentriert (gegen den Fokus der eintreffenden Wellenfront) treten die „Aberrationen“ am Prüfling als zusätzliche OPD auch bei Streifendichte Null auf, die dann von dem Durchmesser des Prüflings und der transmittierten Wellenfront des Kondensors abhängen.
- Ist der Radius des Prüflings identisch mit dem der Fizeau - Sphäre verschwindet dieser Effekt, da an beiden Flächen die gleichen Aberrationen auftreten.
- Für negative Radien wechselt das Vorzeichen.
- Für 10 mm Radius und einen f/0.75 Kondensator ist dieser Effekt ca. um Faktor 20 kleiner als bei dezentrierter Probe.
- Offensichtlich wird dieser Effekt hauptsächlich durch den Öffnungsfehler des Kondensors und zusammen mit dem Shearing der Wellenfront verursacht.



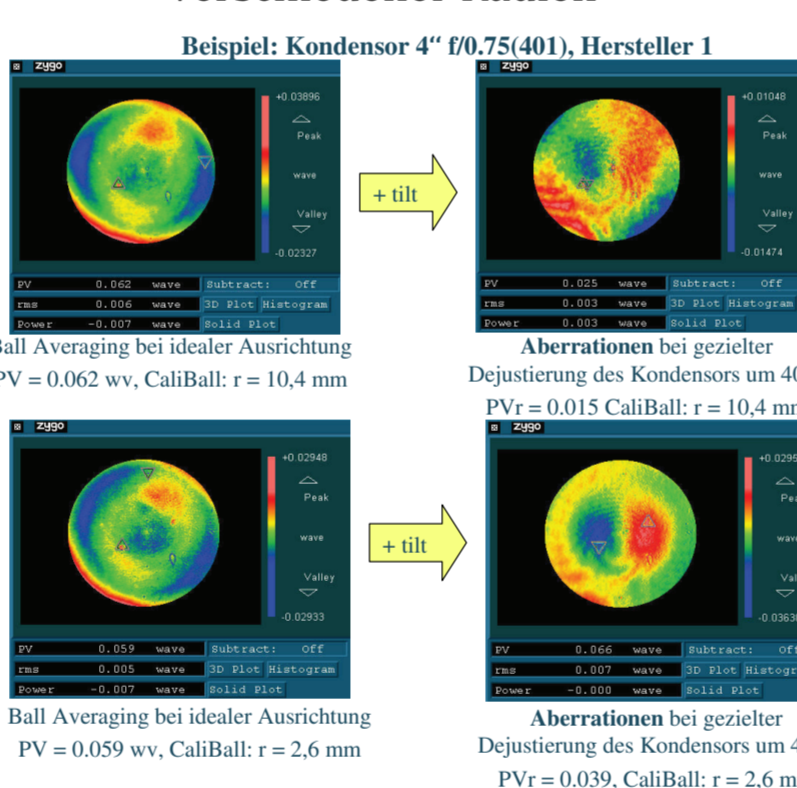
Ball Averaging bei dejustiertem (verkipptem) Kondensator

- Bei den geprüften Kondensoren zeigte sich bei gezielter Verkipfung des Kondensors um 40 Fringes (= 120 µrad = 0.008°) systematische Koma.
- Diese Verkipfung ist während der eigentlichen Messung NICHT zu erkennen (Keine Streifen, „Nulled cavity“!).



Eine Dejustierung des Kondensors um einige Streifen führt schon zu merklich anderen (lambda/100) Ergebnissen der Kalibrierung.

Verkippte Kondensoren u. Kalibrierkugeln verschiedener Radien



- Bei gezielter Verkipfung von Kondensoren zeigt sich ein Zusammenhang zwischen den Aberrationen und dem Radienverhältnis der verwendeten Kalibrierkugel zu der Referenzfläche.

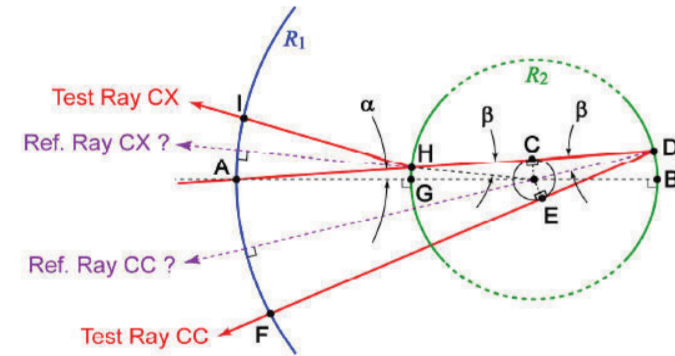
Eine Kalibrierkugel mit Radius nahe dem der Fizeaufläche minimiert den Einfluss ungenau justierter Kondensoren auf das Ergebnis des Ball Averaging

Ergebnisse des Ball Averaging bei verkipptem Kondensator und Kalibrierkugeln verschiedener Radien

Auf Streifenzahl 10 im Cat's Eye normierte scheinbare Koma bei Verkipfung des Kondensors:				
Probenradius[mm]	Z ₁₁	Z ₁₃	PV Coma	
2.6	-0.0091	-0.0011	0.0183	
2.6	-0.0016	0.0098	0.0198	
10.4	0.0010	0.0002	0.0020	
10.4	-0.0005	0.0027	0.0054	
Hersteller 2: 4'' f/0.75				
Probenradius[mm]	Z ₁₁	Z ₁₃	PV Coma	
2.6	-0.0131	0.001	0.0263	
2.6	-0.0015	0.0129	0.0260	
10.4	-0.0036	0.0013	0.0076	
10.4	0.0004	0.0025	0.0050	
Hersteller 1: 4'' f/0.75 (401)				
Probenradius[mm]	Z ₁₁	Z ₁₃	PV Coma	
2.6	-0.0073	0.0006	0.0147	
2.6	0.0001	0.0088	0.0175	
10.4	-0.0027	-0.0015	0.0060	
10.4	-0.0024	0.0014	0.0055	

- Bei allen geprüften Kondensoren entsteht bei gezielter Verkipfung des Kondensors (10 Streifen) scheinbare Koma in der Größenordnung lambda/200 - lambda/30 PV. Aberrationen anderer Art treten eher zufällig und in kleinerer Größenordnung auf.
- Der vorhergesagte Verhältnis der Restfehler für r = 10.4 mm und r = 2.6 mm von = 1:4 und der Vorzeichenwechsel zwischen konvexer und konkaver Probenoberfläche konnte bestätigt werden.

Geometrisches Modell für Cavity-Fehler nach D. M. Sykora



Übertriebene Darstellung der winkelabhängigen Reflexion des unter der Neigung alpha auf die konvexe oder konkave Oberfläche des Prüfling fallenden Strahls.
 Quelle: DANIEL M. SYKORA: A Model for Cavity Induced Errors with Wavefront Slope in High Accuracy Spherical Fizeau Metrology. Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America (CD), 2008.

- Cavity OPD-Fehler eines Fizeau-Interferometers lassen sich nach D.M. Sykora als Funktion des Referenzflächenradius (R₁), des Radius der zu prüfenden Oberfläche (R₂) und der Neigung der transmittierten Wellenfront (alpha) beschreiben, wenn Feld- und Pupillenabhängige Aberrationen vernachlässigt werden.
- Für eine konkave Sphäre ergibt sich für die Differenz der optischen Wegstrecken:

$$OPD = 2 \cdot \overline{AB} - \overline{ADF} = 2(R_1 - R_2) - 2 \left(R_1 \cos(\alpha) - R_2 \cos(\alpha) \left(\sin^{-1} \left(\frac{R_1 \sin(\alpha)}{R_2} \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$OPD \approx \alpha^2 R_1 \left(\frac{\rho+1}{\rho} \right), \quad \rho = \frac{R_2}{R_1}, \quad \rho < 1 \rightarrow OPD \approx \alpha^2 R_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

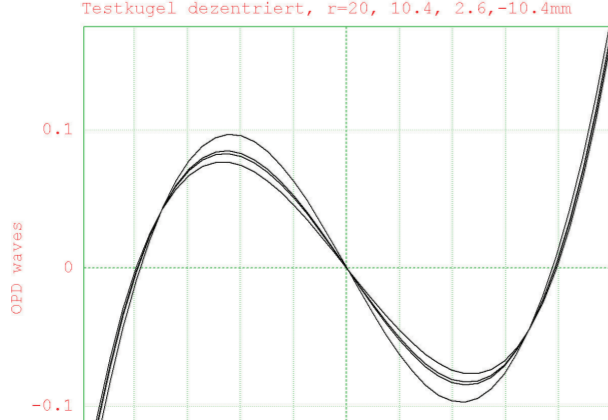
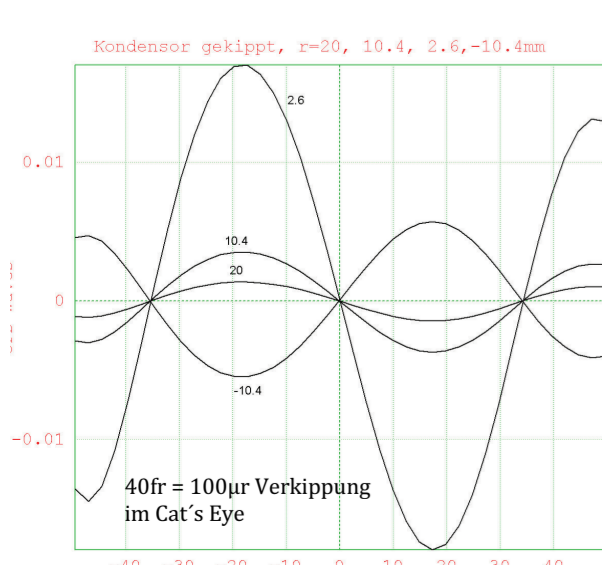
Wäre die transmittierte Wellenfront ideal, d.h. der Kondensator perfekt justiert und die Winkelabweichung alpha = 0 bzw. das Radienverhältnis R₁/R₂ = 1 so ist der Cavity OPD-Fehler Null.

Einschränkungen des geometrischen Modells von Sykora

- Auf Grund der quadratischen Abhängigkeit vom Neigungsfehler sind nur gerade Wellenfrontfehler wie Öffnungsfehler und Astigmatismus zu erwarten.
- Angenommener Fehler der transmittierten Wellenfront, reine Koma.
- Auf Grund von (1) vorhergesagte punktsymmetrische OPD.
- In der Regel sind pupillenabhängige Aberrationen nicht zu vernachlässigen. Für die Winkeländerung beta an einer um d dezentrierten Kugel gilt näherungsweise $\beta = \frac{2d}{R_2} \cos(\gamma)$ und ist so auch umgekehrt proportional zu R₂.
- Dies bedingt einen (variablen) Shear, wodurch sich im Ergebnis der Öffnungsfehler der transmittierten Wellenfront als Koma äußert.

Ergebnisse der Simulation I

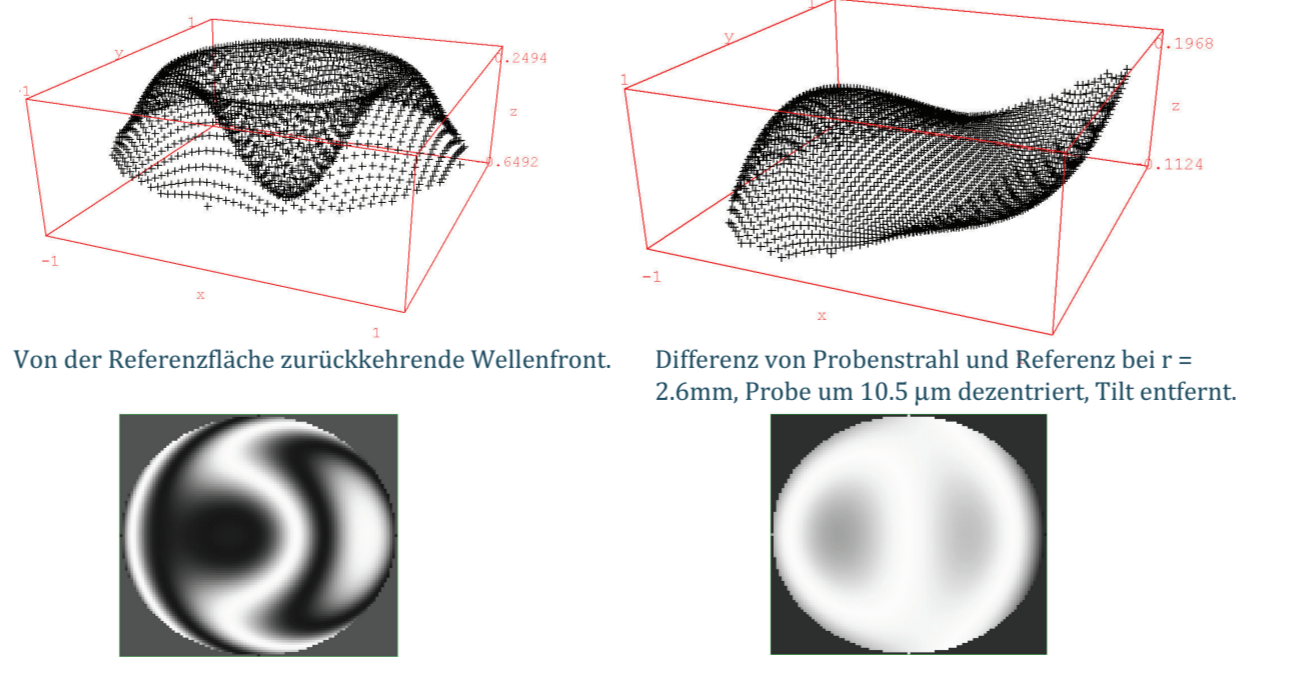
- Diese Simulationsergebnisse basieren auf dem bekannten Design eines 4'' f/0.75 Kondensators (401) (keine Flächenfehler) und idealer einlaufender Wellenfront.



- Die induzierte Koma für dezentrierte Probe und verkippten Kondensator wird in der korrekten Größenordnung vorhergesagt, auch die jeweilige Abhängigkeit vom Kugelradius inklusive Umkehr bei negativen Radien.

Ergebnisse der Simulation II

- Simulation der 2D Wellenfronten 4'' f/0.75 Kondensator und zugehörige Interferogramme.



Von der Referenzfläche zurückkehrende Wellenfront. Differenz von Probenstrahl und Referenz bei r = 2.6mm, Probe um 10.5 µm dezentriert, Tilt entfernt.

Eigene Interferometer Simulation

- Bei der Simulation wurde die abbildende Optik des Interferometers (Afokal etc.) ideal angenommen.
- Einlaufende ebene Welle + „Zernike Fläche“
- Interferenzebene, kann zur Fokussierung verschoben werden.
- (Bekanntes) Kondensordesign + dezentrierbare konische Flächen, alternativ „perfekte aplanatische Linse.“
- Dezentrierbare Testkugel oder ideale virtuelle Quelle.

Zusammenfassung

- Bei erhöhten Anforderungen ist es notwendig, den Restfehler eines Fizeau - Kondensors mit z.B. „Random Ball Test“ zu bestimmen und abzuziehen.
- Nach off-axis performance des Fizeau-Kondensors werden Messungen durch Dezentrierung des Prüflings merklich beeinflusst. Scheinbare Koma variiert annähernd linear mit der lateralen Dezentrierung, andere Zernike-Terme bleiben nahezu unbeeinflusst. Sensitivity Functions erlauben eine Abschätzung und Kompensation der durch Dezentrierung entstehenden geometrischen Fehler.
- Das Ergebnis der Kalibrierung ist auch abhängig vom Radienverhältnis der Kalibrierkugel zu der Fizeau-Sphäre und der Qualität der Wellenfront (lokale Neigung bzw. Öffnungsfehler). Um den Cavity-Fehler zu minimieren sollte eine Kalibrierkugel mit Radius nahe der Fizeau-Sphäre verwendet werden.
- Bei merklichem Öffnungsfehler der transmittierten Wellenfront ist Ball Averaging kritisch auf eine leichte Verkipfung des Kondensors. Durch Verkipfung des Kondensors um etwa 100 µrad bei kleiner Testkugel (f# = 1/0.75, r = 2.6mm) entsteht systematische Koma in der Größenordnung von typisch lambda/30 PV. Dieser Restfehler tritt auch bei Streifendichte Null auf.