

# Hochaufgelöste interferometrische Absolutmessung rotationssymmetrischer Oberflächen-Fehler

Günther Seitz

Carl Zeiss SMT AG, 73446 Oberkochen  
mailto:g.seitz@smt.zeiss.com

Absolutmessverfahren bestimmen die Messgenauigkeit der interferometrischen Messtechnik und damit die Grenzen der Fertigungsgenauigkeit. Vorgestellt wird hier ein Verfahren zur hochaufgelösten Absolutmessung rotationssymmetrischer Oberflächen-Fehler.

## 1 Einführung

Man unterscheidet Absolutmessverfahren zur Messung rotationssymmetrischer und nicht rotationssymmetrischer Oberflächen-Fehler. Gegenstand dieses Artikels ist die Messung rotationssymmetrischer Oberflächen-Fehler mit dem Dreh-Schiebe-Verfahren, welches gleichermaßen zur Messung sphärischer und planer Flächen geeignet ist.

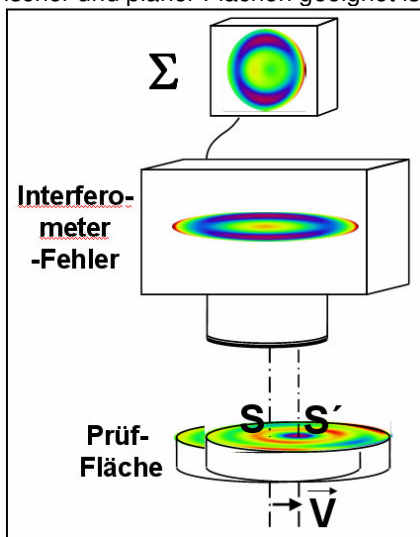


Abb. 1: Dreh-Schiebe-Verfahren

Abb. 1 verdeutlicht die wesentlichen Prozessschritte des Dreh-Schiebe-Verfahrens. Nicht rotationssymmetrische Prüflingen-Fehler werden ausgeglichen durch Drehmittelung um den Flächenscheitel S. Dazu wird über eine hinreichend große Anzahl äquidistanter Drehstellungen der Prüflinge gemittelt. Es verbleiben nur rotationssymmetrische Fehler bzw. das radiale Profil der Prüflinge, überlagert vom Interferometer-Fehler. Im nächsten Schritt wird die Prüflinge lateral um den Verschiebungs-Vektor V verschoben. Wieder werden die nicht rotationssymmetrischen Oberflächen-Fehler durch Drehmittelung um den verschobenen Scheitel S' ausgeglichen.

Bildet man die Differenz beider Mittelungs-Ergebnisse, so verschwindet der Interferometer-Fehler.

Übrig bleibt die Wellenfront  $W_d$  (s. Abb. 2), die Differenz aus radialem Profil  $RP(r)$  und verschobenem radialem Profil  $RP(r')$ , also das gescherte radiale Profil:

$$W_d = RP(r) - RP(r') \quad (1)$$

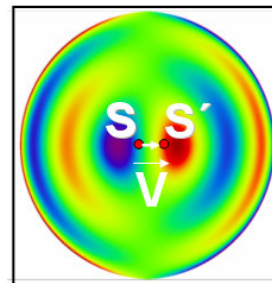


Abb. 2: Differenz-Wellenfront/geschertes rad. Profil  $W_d$

Ziel ist die Rekonstruktion des radialen Profils  $RP(r)$  aus diesem gescherten radialen Profil  $W_d$ .

## 2 Polynom-basierte Rekonstruktion

An das gescherte radiale Profil  $W_d$  wird ein entsprechend geschertes rotationssymmetrisches Polynom der Form  $a_n \cdot r^{2n}$  angepasst:

$$RP(r) - RP(r') = \sum_n^N a_n \cdot (r^{2n} - r'^{2n}) \quad (2)$$

Damit erhält man eine Beschreibung des radialen Profils in Gestalt des Koeffizienten-Vektors  $a_n$ .

Der hierbei auftretende Fit-Fehler reduziert sich mit zunehmender Fit-Ordnung N. Allerdings wird die Größe von N durch numerische Probleme beim Polynom-Fit auf Werte um  $N \approx 20$  begrenzt, weshalb dieses Verfahren nur unter günstigen Bedingungen hohe Genauigkeiten liefert.

## 3 Pixelbasierte Rekonstruktion

Gleichung (1) ist unterbestimmt und kann daher nicht unmittelbar nach dem radialen Profil  $RP(r)$  aufgelöst werden. Betrachtet man allerdings  $W_d$  nur auf einen Kreis um den Scheitel S' (Abb. 3), so ist  $RP(r') = \text{const}$  und aus Gl. (1) folgt:

$$RP(r) = W_d + \text{const} \quad (3)$$

Demnach liefert ein kreisförmiger Profil-Schnitt durch  $W_d$  das radiale Profil  $RP(r)$  bis auf eine additive Konstante. Allerdings gibt ein solcher Schnitt nicht das vollständige radiale Profil wieder, sondern nur ein Teil-Profil der Breite  $\Delta r = 2 \cdot |V|$  (s. Abb. 3). Zur Gewinnung des vollständigen radialen Profils sind weitere kreisförmige Schnitte mit verändertem  $r'$  erforderlich. Eine unmittelbare stetige Verbindung der so gewonnenen Teil-Profile ist jedoch nicht möglich, weil sich die additive Konstante (Gl. 3) mit  $r'$  ändert. Daher werden, wie in Abb. 5 gezeigt, im Überlapp-Bereich der Teil-Profile die Differenzen der Konstanten ermittelt und zum jeweiligen Teil-Profil addiert.

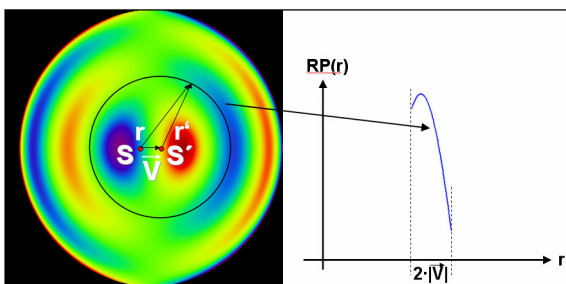


Abb. 3: Differenz-Wellenfront mit Radialschnitt um  $S'$

Diese kreisförmigen Schnitte durch die Differenz-Wellenfront sind jedoch infolge des diskreten Pixelrasters der CCD-Kamera mit Interpolations-Fehlern verbunden (s. Abb. 4). Ferner ist das gewonnene Teil-Profil nicht äquidistant in  $r$ . Die Teil-Profile liegen also auf unterschiedlichem  $r$ -Raster vor und müssen zur oben beschriebenen Anpassung der Konstanten auf ein gemeinsames Raster interpoliert werden.

Zur Vermeidung dieser zweimaligen Interpolation wird eine alternative Darstellung der Differenz-Wellenfront gewählt. Die kartesischen Koordinaten der Kamera-Pixel werden in Abstandskordinaten  $r$  und  $r'$  bezüglich der beiden Scheitelpunkte  $S$  und  $S'$  transformiert und gemäß Abb. 4 in einem orthogonalen Koordinatensystem dargestellt.

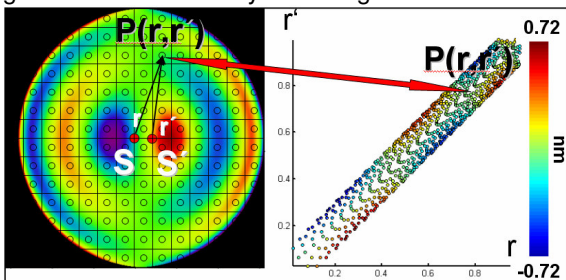


Abb. 4: Differenz-Wellenfront mit Pixelraster,  $x/y$  bzw.  $r/r'$ -Darstellung

Über den so transformierten Wellenfront-Werten wird, wie in Abb. 5 gezeigt, eine Fläche aufgespannt. Ein kreisförmiger Schnitt um Scheitel  $S'$  entspricht in dieser Darstellung einem Horizontal-Schnitt. Abb. 5 zeigt Teil-Profile für 3 Horizontal-Schnitte, welche durch Korrektur der Konstanten

aneinander angepasst werden. Analog dazu erfolgt die Rekonstruktion des kompletten radialen Profils der Prüf-Fläche, wobei allerdings eine größere Anzahl horizontaler Schnitte verwendet wird.

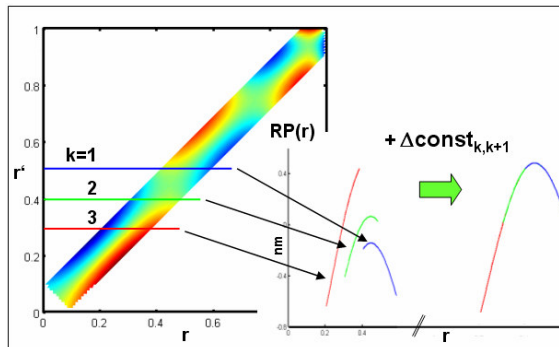


Abb. 5: Differenz-Wellenfront in  $r/r'$ -Darstellung mit Profil-Schnitten, Teil-Profilen und angepassten Teil-Profilen

#### 4 Vergleich Polynom/Pixelbasierte Auswertung

Abb. 6 zeigt das radiale Profil einer Prüfflächen-Messung, ausgewertet nach Polynom- bzw. Pixelbasierten Verfahren. Deutlich sieht man die glättende Wirkung der Polymbasierten Auswertung.

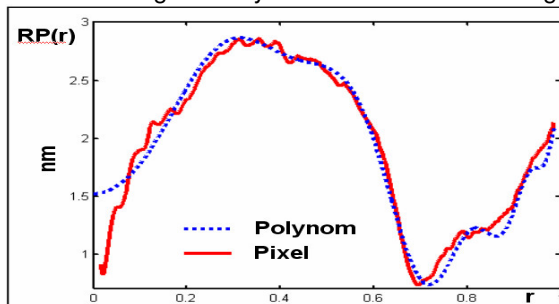


Abb. 6: Vergleich: Polynom-/Pixelbasierte Auswertung

Abb. 7 zeigt zwei unabhängige Messungen derselben Prüffläche, gemessen in einem zeitlichen Abstand von 24 h und ausgewertet mit dem Pixelbasierten Verfahren. Die hier ermittelte Reproduzierbarkeit beträgt 20 pm RMS !

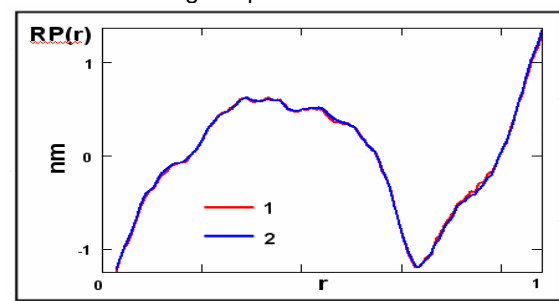


Abb. 7: Reproduzierbarkeit Pixelbasierte Auswertung

#### 5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren zur Absolutmessung rotationssymmetrischer Oberflächen-Fehler erlaubt eine pixelgenaue Rekonstruktion des radialen Profils der Prüf-Fläche. Erreicht werden dabei Reproduzierbarkeiten von bis zu 20 pm RMS (Wellenfront).