

Korrekturbearbeitung optischer Freiformflächen für sub- μm -Formgenauigkeiten im Spritzgusswerkzeug

Lars Dick, Jenoptik Polymer Systems GmbH, Triptis
 Ralf Steinkopf, Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

Der Spritzguss ermöglicht die kostengünstige Abformung hochpräziser Kunststoffoptiken für Massenanwendungen. Werden dabei für die optische Funktion nicht-rotationssymmetrische Flächen benötigt, wie z.B. bei "head mounted devices" (HMDs), "head up displays" (HUDs) oder innovativen LED-Beleuchtungsoptiken, ist für deren optische Qualität die Formgenauigkeit der Freiformflächen entscheidend. Diese wiederum hängt von der Güte der Formeinsätze ab, die in Ultrapräzisionsbearbeitungsmaschinen mit monokristallinem Diamantwerkzeug gefertigt werden.

Für klassische rotationssymmetrische Flächen wie z.B. Sphären und Asphären lassen sich im 2-Achsen-Diamantdrehverfahren Formgenauigkeiten $<1 \mu\text{m}$ peak to valley (p-v) durch verschiedene Korrekturstrategien schnell und problemlos erreichen. Die messtechnische Erfassung des Fertigungsergebnisses sowie die Korrekturbearbeitung sind Stand der Technik.

Dagegen ist die hochgenaue Erfassung und Korrektur nicht-rotationssymmetrischer Flächen ein Forschungsthema, das derzeit systematisch untersucht wird [1]. Um grundlegende Kenntnisse zu gewinnen, wurde eine Freiformfläche definiert, gefertigt, vermessen und gezielt korrigiert. Wir berichten hier über die Ergebnisse.

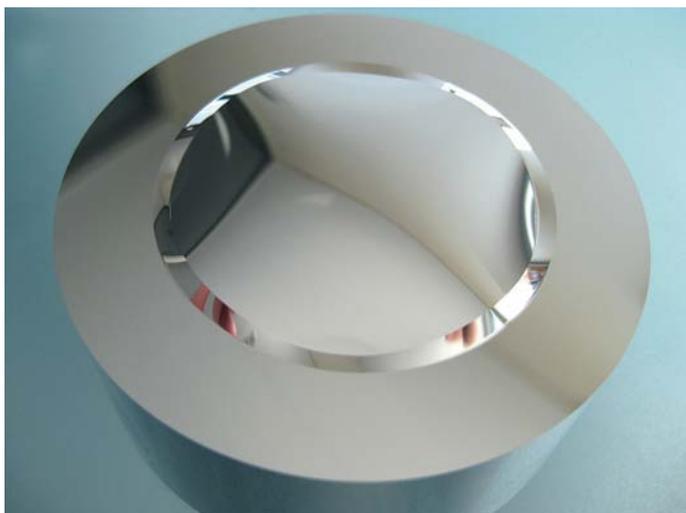


Bild 2: Gefertigter Formeinsatz mit nicht-rotationssymmetrischer optischer Funktionsfläche

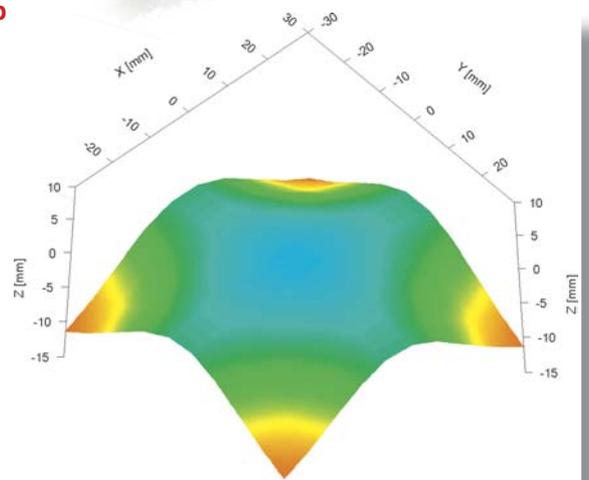


Bild 1: Falschfarbendarstellung zur definierten Freiformfläche mit vier Maxima und Minima entlang des Umfangs

1 Definition und Fertigung einer exemplarischen Freiformfläche

Zur Fertigung einer Freiformfläche werden zunächst exakte mathematische Beschreibungen zur vollständigen Definition der komplexen Fläche benötigt. Nicht-rotationssymmetrische

Flächengeometrien können unter anderem durch NURBS (Non uniform rational B-splines), B-splines, Zernike- und xy-Polynome (extended polynomials) mathematisch beschrieben werden. Übliche CAD-Austauschformate sind hier z.B. IGES und STEP sowie Punktwolken [2].

Als beispielhafte Geometrie für eine optische Freiformfläche wurde ein sogenanntes

„Tetrafoil“ untersucht (siehe **Bild 1**), das mit einem Zernikekoeffizienten $Z(4,4)$ und einem sphärischen Radius R mathematisch nach Gleichung (1) exakt definiert ist. Die Gleichung setzt sich damit aus einem rotationssymmetrischen und einem nicht-rotationssymmetrischen Term zusammen, der auf einen Radius von 20 mm normiert ist.

$$Z_{\text{rotationssym}}(x,y) = Z_{00}(x,y) + Z_{04}(x,y) = Z_{\text{zernike}}(4,4) \cdot \sqrt{10} \cdot \left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{20} \right)^4 \cdot \cos(4 \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right)) + \frac{1}{R} \cdot (x^2+y^2) \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1}{R}\right)^2 \cdot (x^2+y^2)} \right) \quad (\text{Gl. 1})$$

Bei den kartesischen Koordinaten x, y, z stellt z die Pfeilhöhe bei einer bestimmten x - und y -Koordinate dar, $Z_{\text{Zernike}}(4,4)$ ist der Zernikekoeffizient zur Beschreibung eines „Tetrafoils“ und R der Radius der sphärischen Geometrie. Der Durchmesser der definierten Freiformfläche beträgt 40 mm, und die Abweichung von der Rotationssymmetrie steigt zum Rand der Fläche auf 1,26 mm.

Bild 2 zeigt das Fertigungsergebnis. Zur Herstellung optischer Freiformflächen eignen sich die in [3] näher erläuterten Verfahren der spanenden Ultrapräzisionsbearbeitung mit einer monokristallinen Diamantschneide. Um die oben gezeigte Flä-

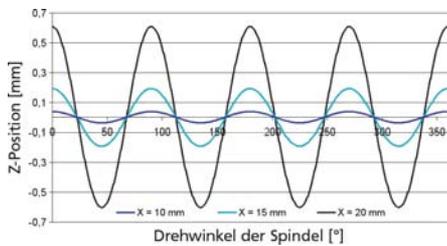


Bild 3: Z-Bewegung des Diamantwerkzeugs bei verschiedenen X-Positionen über eine Spindelumdrehung

chencharakteristik zu realisieren, stellt das sogenannte Slow-Tool-Servo-Verfahren eine praktikable Lösung dar. Dies ist ein modifiziertes Diamantdrehverfahren, das neben zwei Linearachsen eine gesteuerte Rotationsachse verwendet. Der nicht-rotationssymmetrische Anteil wird durch eine dynamische Bewegung des Werkzeugs in Richtung der optischen Achse realisiert. Dieser durch die Maschinensteuerung hochgenau geregelte Hub der Z-Achse ist für verschiedene X-Positionen in **Bild 3** dargestellt.

Neben der Positioniergenauigkeit der Maschine (**Bild 4**) spielt die Radiengenauigkeit des Diamantwerkzeugs (**Bild 5**) eine entscheidende Rolle für die Formgenauigkeit der gefertigten Fläche. Die Restwelligkeit der monokristallinen Diamantschneide kann derzeit mit $<0,2 \mu\text{m}$ und einer Schneidkantenverrundung im Nanometerbereich realisiert werden.

Von großer Bedeutung bei diesem Fertigungsprozess sind sehr konstante Umgebungseinflüsse mit minimalen Störungen, da die Feinbearbeitung der optischen Oberfläche mit einem Vorschub von typisch wenigen Zehntelmillimetern pro Minute mehrere Stunden dauert.

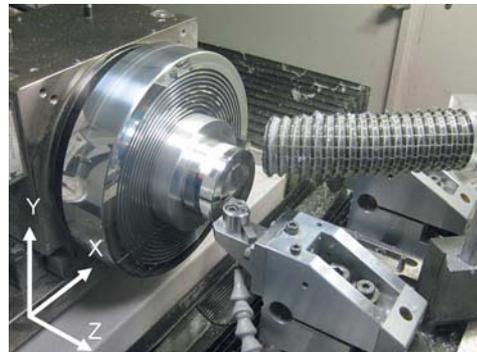


Bild 4: Maschinenkonfiguration zur Ultra-Präzisionsbearbeitung von Freiformflächen



Bild 5: Monokristallines Diamantwerkzeug mit Halter

2 Messtechnische Auswertung

Um das Fertigungsergebnis hinsichtlich der Formabweichung zu beurteilen, wurde am IOF das Ultrapräzisions-3D-Profilometer Panasonic UA3P genutzt, dessen Messdaten auch die Basis für die Berechnung der Korrekturwerte sind. Mit diesem System wird eine Messgenauigkeit bei der vorgestellten Flächencharakteristik (Größe, Anstiege) von 50 nm erreicht. Während des Messvorgangs erfasst ein Diamant-radientaster zeilenförmig mit definierter Rastergröße die gesamte Fläche.

Das Bauteil wird für die Messung anhand des Außendurchmessers und einer Winkelorientierung ausgerichtet, jedoch fehlen am Bauteil Referenzmarken, um die gewonnenen kartesischen Koordinaten im ASCII-Format zur Ist-Oberfläche gezielt auszuwerten und alle Freiheitsgrade zu fixieren. Daher wurde ein mathematischer Algorithmus entwickelt, der die Soll- und Messdaten in allen sechs Freiheitsgraden iterativ variieren kann und somit Positionsfehler der Messmaschine ausgleicht. Nach

sich die Formabweichung der Freiformfläche darstellen. Beim Analysieren der Fehlerinflüsse der einzelnen Freiheitsgrade einer exemplarischen Messung erkennt man eine Verdrehung um die Z-Achse als Hauptursache für das Fehlerbild. Die Differenz zwischen Soll- und Messdaten beträgt beim direkten Vergleich einer exemplarischen Messung zu den Soll- und Messdaten ca. $70 \mu\text{m}$ (p-v), wie in **Bild 6** dargestellt. Die Messdaten wurden im Anschluss beim Durchlaufen des entwickelten Fit-Prozesses um die Beträge in **Tabelle 1** gekippt und verschoben, um das tatsächliche Fehlerbild der gefertigten Freiformfläche mit einer Formabweichung von $1,9 \mu\text{m}$ (p-v) und 274 nm (rms) darzustellen (**Bild 7**).

Die Analyse des tatsächlichen Fehlerbildes zeigt, dass der Formfehler dort am

Verschiebung [μm]		Verkipfung [°]	
in x	-31,3	um x - Achse	-0,32
in y	-9,7	um y - Achse	-1,1
in z	-2,5	um z - Achse	-56,1

Tabelle 1: Berechnete Werte zur Koordinatentransformation der Messdaten

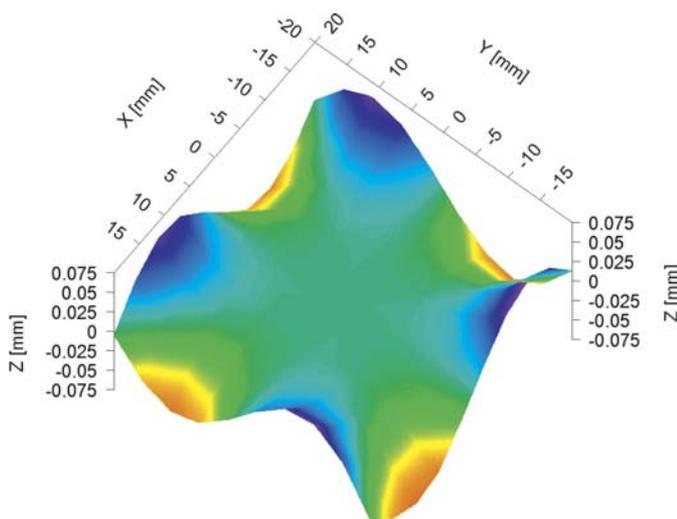


Bild 6: Fehlerfläche beim direkten Vergleich zwischen Soll- und Messdaten ohne Kompensation von Messpositionsabweichungen durch einen mathematischen Algorithmus

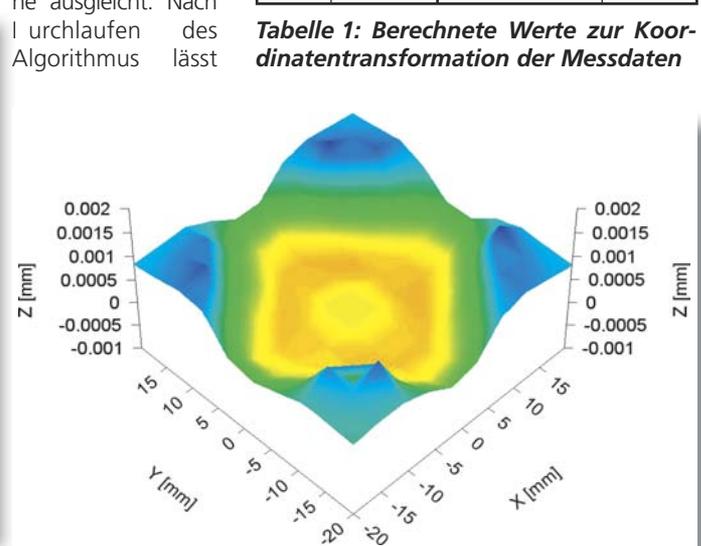


Bild 7: Tatsächliche Fehlerfläche nach Verwendung des mathematischen Algorithmus

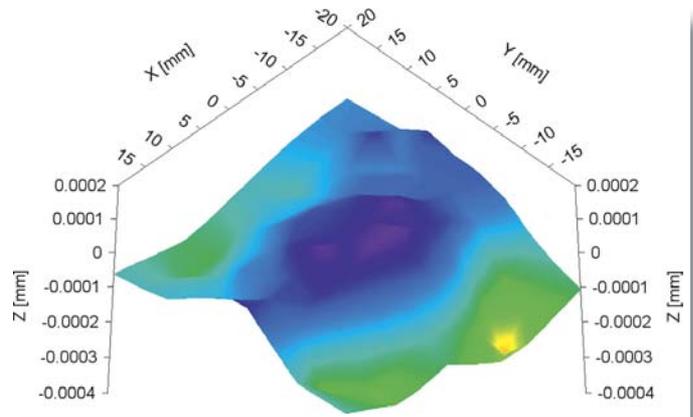
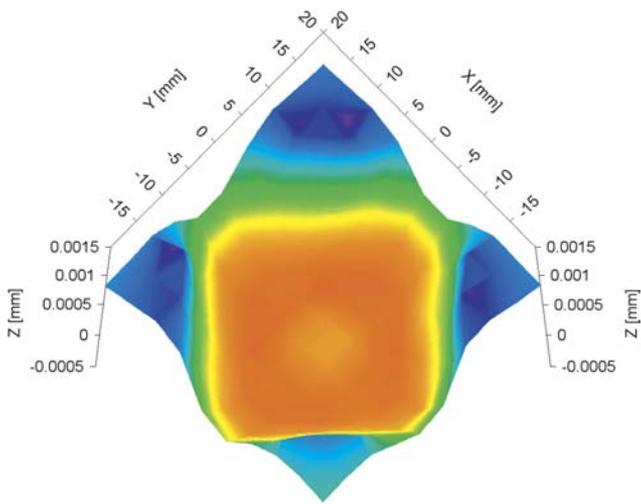


Bild 8 und 9: Falschfarbendarstellung der Fehlerfläche vor der Korrekturbearbeitung (links) und danach (rechts)

ausgeprägtesten ist, wo auch die Abweichung von der Rotationssymmetrie am größten ist. Im Mittenbereich der Fläche ist eine Fehlercharakteristik zu erkennen, wie sie auch beim 2-Achsen-Drehprozess zur Fertigung rotationssymmetrischer Flächen (Sphären, Asphären) typisch ist.

3 Korrekturbearbeitung

Da die Sollfläche und nun auch die exakte Fehlerfläche bekannt ist, die ebenfalls eine Freiformfläche darstellt, können geeignete Daten für eine Korrekturbearbeitung mit der Diamantschneide generiert werden. Dafür werden auf der Ultrapräzisionsmaschine bis auf das gezielt modifizierte CNC-Programm sämtliche technischen Parameter konstant gehalten. Nach der Korrekturbearbeitung wird die Fläche erneut messtechnisch erfasst und ausgewertet. So konnte im vorgestellten Beispiel eine verbesserte Formabweichung von ca. $0,48 \mu\text{m}$ (p-v) respektive 80 nm (rms) erreicht werden. Anhand der Formfehler vor (**Bild 8**) und nach (**Bild 9**) der Korrekturbearbeitung sind die nun deutlich kleineren Fehleramplituden und eine wesentlich homogenere Gestalt der Fehlerfläche zu ersehen.

4 Fazit

Der diskutierte Weg zur Fertigung, Messung und Korrekturbearbeitung optischer Freiformflächen stellt eine innovative Prozesskette dar, mit der fertigungsbedingte Fehler optischer Freiformflächen stark minimiert werden. Der Formfehler konnte durch geeignete technische Maßnahmen zur Korrekturbearbeitung gezielt um 75% (p-v) reduziert werden. Damit wurde für eine Freiformfläche mit 40 mm Durchmesser eine deutliche Verbesserung der Formgenauigkeit in den Submikrometerbereich unter $0,5 \mu\text{m}$ (p-v) erreicht. Solche hohen Fertigungsgenauigkeiten in der Freiformflächenbearbeitung bieten eine solide Basis für die Abformung neuartiger Freiformoptiken für den Massenmarkt mittels Präzisionsspritzguss. Das Fertigungsverfahren kann nun u.a. auf Spritzgusswerkzeuge mit Freiformgeometrien für Abbildungs- und Beleuchtungsoptiken angewendet werden.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen werden gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Fördermaßnahme „Freiformoptiken“, Projektträger VDI-Technologiezentrum Düsseldorf (JOPS FdK: 13N10826; Fraunhofer IOF FdK: 13N10827).

Literaturhinweise:

- [1] www.bmbf.de/de/3591.php
- [2] J. Zänkert, *Freiformflächen in der Display-Technologie*, Workshop „Optische Freiformflächen“, Nürnberg, 18.3.2009
- [3] R. Eberhardt, *Freiformoptik*, Laser und Photonik 3/2010

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Lars Dick
Leiter Ultrapräzisionstechnologie
Jenoptik Polymer Systems GmbH
Am Sandberg 2
D-07819 Triptis
Tel. 036482/45-102
Fax 036482/45-111
eMail: lars.dick@jenoptik.com
Internet: www.jenoptik.com/oes



Dipl.-Ing. Ralf Steinkopf
Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Feinwerktechnik
Albert-Einstein-Str. 7
D-07745 Jena
Tel. 03641/807-336, Fax 03641/807-604
eMail: ralf.steinkopf@iof.fraunhofer.de
Internet: www.iof.fhg.de

