

Berührungslose Prüfung komplexer Optik-Komponenten

Neuartige Optiken mit komplexen Geometrien erweitern den Spielraum für innovative Produktionsprozesse – und stellen die Messtechnik vor neue Herausforderungen. Die Kombination aus einem hochgenauen faseroptischen Sensor und einer präzisionsgeführten kinematischen Einheit ermöglicht eine schnelle, fertigungsnahe 100-Prozent-Prüfung.

Frank Depiereux, fionec GmbH
Kurt Rämer, Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT

Mit dem Einzug optischer Technologien in die Fertigung sind für die Entwicklung neuer Produkte und Prozesse ganz neue Möglichkeiten entstanden. Das Potenzial technologischer Fortschritte, beispielsweise in der Laser-Lichterzeugung, kann bislang aber nur zum Teil ausgeschöpft werden, weil aktuelle Systeme zur Strahlführung in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt sind. Neuartige Quarz- und Diamantoptiken mit komplexen Geometrien wie Asphären, Freiformflächen und Array-Strukturen sollen das Feld der Einsatzmöglichkeiten in Zukunft deutlich erweitern.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird daher ein neuer Herstellungsprozess für das Präzisionsblankpressen von Quarzgläsern (**Bild 1**) entwickelt. Eine



Bild 1: Abformwerkzeug mit Linse

der Herausforderungen bei diesem Fertigungsverfahren liegt in dem starken Werkzeugverschleiß, der durch die hohen Temperaturen und Drücke während des Pressprozesses entsteht. Mikrorisse an den Presswerkzeugen und Adhäsionen beeinträchtigen die Oberflächen und damit die optischen Eigenschaften

der Linsen. Deshalb ist eine fortlaufende metrologische Qualitätskontrolle notwendig.

Relevante Parameter für Funktion und Leistungsfähigkeit der optischen Komponenten sind Form und Rauheit. Tolerierbare Abweichungen bewegen sich im Sub-Mikrometerbereich. Ein geeignetes Messsystem muss neben höchsten Genauigkeiten auch einen schnellen, fertigungsnahe und vor allem berührungslosen Prüfvorgang gewährleisten. Taktile Messgeräte kommen daher für die Prüfung der Optiken nur begrenzt infrage.

Produktionsnahe Lösung

Optische Sensoren arbeiten im Gegensatz zu taktilem Tastern berührungslos und damit zerstörungsfrei. Durch hohe Messfrequenzen lassen sich sehr kurze Prüfzeiten und hohe Messpunktdichten

erreichen. Eine Einbindung in bestehende Fertigungsanlagen zur Inline-Messung ist ohne großen Aufwand möglich.

Etablierte Systeme zur Optikprüfung nutzen aufgrund der geforderten Genauigkeiten zumeist Laser- oder Weißlichtinterferometer. Die Grenze der Einsatzmöglichkeiten optischer Messsysteme bei der Optikprüfung ist aber weniger durch das jeweilige Messverfahren als vielmehr durch die Bauform und -größe der verwendeten Messapparatur gegeben. Gerade bei sehr kleinen, dicht gesetzten Arrays, konkav geformten Prüfstücken oder komplexen Freiformflächen stößt ein Standardmesskopf schnell an benachbarte Bauteilflanken an. Platzsparende, produktionsnahe Prüfprozesse sind damit schwer umsetzbar.

Berührungslose Mikromesstechnik

Die fionec GmbH und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT entwickeln deshalb ein faseroptisches Präzisionsmesssystem mit hochgenauer Sensorik und miniaturisierter Messsonde. Mit einem Durchmesser von 1,4 mm ist die speziell konfektionierte Sonde auch noch bei kleinen, konkav geformten Bauteilen einsetzbar (Bild 2). Durch die geringe Baugröße ist auch eine einfache und nahezu gewichtsfreie Integration der Mikromesssonde in verschiedenste Mess- und Prüfaufbauten oder direkt in Ultrapräzisionsmaschinen zur Optikfertigung möglich.

Die Messsonden basieren vollständig auf Lichtwellenleitern. Die Verwendung optischer Fasern ermöglicht eine individuelle Konfektionierung der Sonden bis hin zu einer Miniaturisierung des Außendurchmessers auf nur 80 µm. Die Verbindung zwischen Sonde und Auswerteeinheit ist in ihrer Länge nahezu beliebig variabel. Dadurch ist das Messsystem sehr flexibel und robust und auch im direkten Industrieumfeld einsetzbar.

Das faseroptische Messsystem beruht auf dem Prinzip der kurzkohärenten Interferometrie [1] und bietet damit zwei entscheidende Vorteile gegenüber der Laser-Interferometrie: Zum einen sind Messungen auch auf optisch rauen Oberflächen möglich, zum anderen ist die Messung absolut. Das heißt, auch nach einer Unterbrechung des Messvorgangs – z. B. durch eine Messstrahlabschattung oder durch Oberflächendefekte – geht der Messwert nicht verloren.

Bei diesem interferometrischen Verfahren wird Licht einer kurzkohärenten, fasergekoppelten Quelle in einen optischen Koppler geleitet und von dort zur eigentlichen Messsonde übertragen. An der Messsonde werden die Wellen in Referenz- und Messsignal aufgespalten. Bei ihrer Rückkehr überlagern sich die Wellen in der optoelektronischen Auswerteeinheit. Das entstehende Interferenzmuster kann anschließend in einen Abstandswert umgerechnet werden.

Das Interferenzprinzip stellt die hohe Genauigkeit der Messdaten sicher, die aufgrund der Oberflächengüte und der geringen Fertigungstoleranzen der zu prüfenden Optiken erforderlich ist. Die vergleichsweise große numerische Apertur der Messsonden von 0,20 erfasst Flankenwinkel bis 10° ohne Einschränkungen bei der Signalqualität. Größere Flankenwinkel können durch Anstellen der Sonde gemessen werden.

Durch die hohe Messfrequenz von bis zu 8 kHz und einer Messunsicherheit von unter 10 nm eignet sich dieses Verfahren ideal für schnelle und präzise Oberflächenmessung. Auch Freiformflächen ohne Rotationssymmetrie können von der interferometrischen Sensorik erfasst werden.

Präzisionskinematik

Damit die Sensorik ein möglichst großes Spektrum an Oberflächenformen erfassen kann, müssen die Position und der Anstellwinkel der Messsonde zur Oberfläche individuell und präzise angepasst werden können. Abweichungen, die bei der Führung und Positionierung des Sensors auf Seiten der Ki-

nematik entstehen, gehen in der Regel direkt als Messunsicherheit in das Messergebnis ein. Bei der Entwicklung liegt daher neben der Sensorik ein besonderes Augenmerk auf der präzisionsgeführten, mehrachsigen Kinematikeinheit (Bild 3).

Ausgelegt ist die Präzisionskinematik für Vollflächenscans der Oberfläche über frei programmierbare Scanbahnen. Zwei Linearachsen (X, Z) und eine Rotationsachse (B) positionieren die Messsonde (S) hochgenau entsprechend der vorgegebenen Sollkontur. Die Sonde steht dabei orthogonal zur Optikoberfläche.

Das zu prüfende Bauteil wird auf einer weiteren hochpräzisen, luftgelagerten Rotationsachse (C) aufgespannt, sodass es während des Messvorgangs unter der optischen Sonde rotieren kann. Mit diesem Aufbau kann das System sowohl sphärische als auch asphärische sowie – aufgrund der geringen Baugröße der Messsonde – konvex und konkav geformte Linsen erfassen. Die Führung der Sonde erfolgt auf Grundlage der Sollform, die beispielsweise mittels CAD-Daten im System hinterlegt werden kann.

Die Abstände der Messpunkte können abhängig von der jeweiligen konkreten Messaufgabe für einzelne Regionen der Oberfläche individuell festgelegt werden. Zur Bestimmung der Rauheitswerte sind sehr hohe Punktedichten notwendig. Die Erfassung der Form hingegen kann mit deutlich weniger Punkten und damit in sehr kurzen Prüfzeiten erfolgen. Bei Bedarf lassen sich Formabweichungen und Rauheitsparameter auch in nur einem Messvorgang erheben (Bild 4). ➤

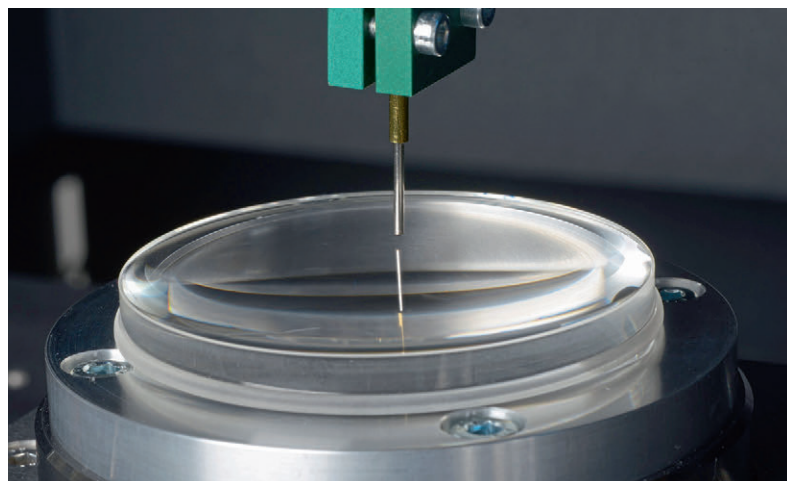


Bild 2: Faseroptische Sonde während des Messvorgangs (Testobjekt Asphäre)

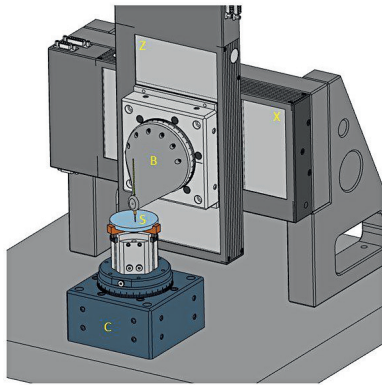


Bild 3: Prinzipische Präzisionskinematik

Normgerechte Auswertung

Zur Auswertung der optisch erhobenen Messdaten wird eine spezielle Software programmiert. Diese steuert zum einen die Sensorbewegung und kombiniert zudem die Daten von Kinematik und Sensor zu einer dreidimensionalen Punktwolke.

Die erfassten Daten ermöglichen eine Bestimmung der Formabweichung und der relevanten linearen R- oder flächigen S-Rauheitsparameter. Der Berechnung liegen die einschlägigen Normen zur Rauheitsauswertung zugrunde. Formabweichungen werden durch einen Soll-Ist-Vergleich sichtbar und von der Software durch Falschfarben oder als Abweichungsvektoren angezeigt. Zukünftig kann die Sollkontur im System sowohl als CAD-Datei als auch durch die Eingabe geeigneter Stützstellen oder der asphärischen Koeffizienten nach ISO 10110 eingegeben werden (Bild 5).

Messergebnisse

Im ersten Abschnitt des DPP-Forschungsprojekts wurde die konfektionierte faseroptische Sensorik in Vortests zunächst in einem hochgenauen Koordinatenmessgerät (KMG) eingesetzt. Mit diesem Messaufbau wurden hochauflösende Scans einer blankgepressten konvex geformten Asphäre aufgenommen. **Tabelle 1** fasst die wichtigsten Parameter der Untersuchung zusammen.

Um während des Messvorgangs nur eine Achse bewegen zu müssen und so Fehlereinflüsse aus der verwendeten Kinematik zu minimieren, wurden als Messstrategie parallel versetzte Linienscans gewählt. Die Messung umfasste insgesamt drei Felder (A, B, C), die der Sensor mit unterschiedlich großer Punktdichte abtastete. In **Bild 6** ist die 3D-Punktwolke von Feld A wiedergegeben. Zu beachten ist, dass die z-Koordinate um einen Faktor 15 vergrößert wurde, um eine bessere Darstellung der Kugelform der Asphäre zu gewährleisten.

In **Bild 7** ist gut zu erkennen, dass die Messpunktedichte mit kleiner werdender Messfeldgröße steigt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Sensorik größere Messfelder, die beispielsweise zur Bestimmung von Formabweichungen herangezogen werden können, schneller erfasst. Ist für eine Rauheitsauswertung eine hohe Auflösung erforderlich, kann die Punktedichte für ein kleines Messfeld gezielt angepasst werden. Selbst bei diesen hohen Auflösungen arbeitet die optische Sensorik bis zu zehnmal schneller als vergleichbare taktile Verfahren.

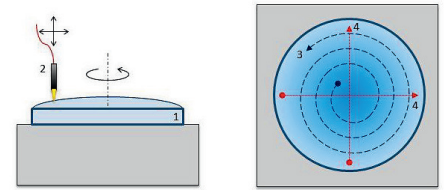


Bild 4: Links: Durch die Rotation der optischen Komponente (1) und die Linearbewegungen der Messsonde (2) ermöglicht das integrierte Präzisionsmesssystem Vollflächenscans mit individuell definierbarer Abtastung. Rechts: In einem kombinierten Messvorgang erfasst die Sensorik Form (3: Spiralbahn) und Rauheit (4: Linienscans).

Mithilfe der Daten aus Messfeld A wurde der Radius durch einen Kugel-Bestfit in CloudCompare [3] bestimmt. In den Designdaten der Asphäre ist der Sollradius mit 205,165 mm angegeben, die taktile Vergleichsmessung lieferte einen Wert von 205,713 mm und die optische Messung 205,027 mm.

Eine Minimierung externer Fehlereinflüsse und damit eine Steigerung der Zuverlässigkeit der Messdaten ist mit der Weiterentwicklung der DPP-Präzisionskinematik zu erwarten. Das neue Messsystem wird sowohl Formabweichungen als auch Rauheitskennwerte in deutlich kürzeren Prüfzeiten liefern, als es mit den etablierten Messgeräten bisher möglich ist. Eine integrierte Komplettlösung kann zudem zu deutlich

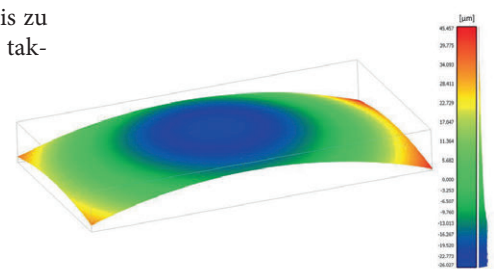


Bild 6: 3D-Darstellung der Messung (Testobjekt Asphäre). Dargestellt ist der Abstand zur z-Ebene in Mikrometern.

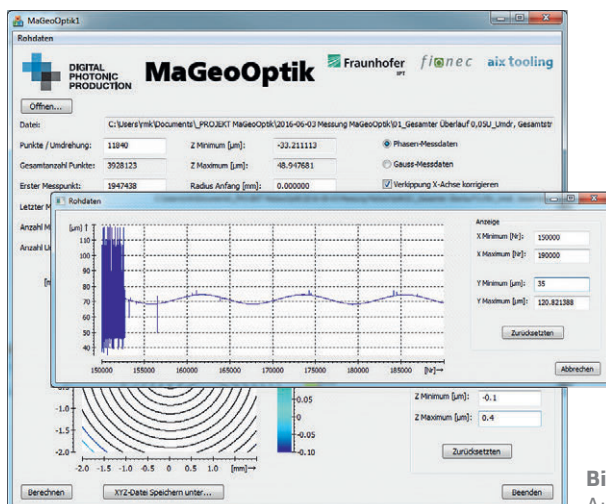


Bild 5: Prototyp Auswertesoftware

[1] Depiereux, F.; Lehmann, P.; Pfeifer, T.; Schmitt, R. (2007): Fiber-optical sensor with miniaturized probe head and nanometer accuracy based on spatially modulated low-coherence interferogram analysis. In: Applied optics 46 (17), S. 3425–3431.

[2] Ströer, F.; Seewig, Jörg; Depiereux, F. (2014): Vergleichbare Ergebnisse. Rauheitsmessung taktile oder optisch? In: Qualität und Zuverlässigkeit: QZ 59 (05), S. 70–72.

[3] CloudCompare: 3D point cloud and mesh processing software, www.cloudcompare.org

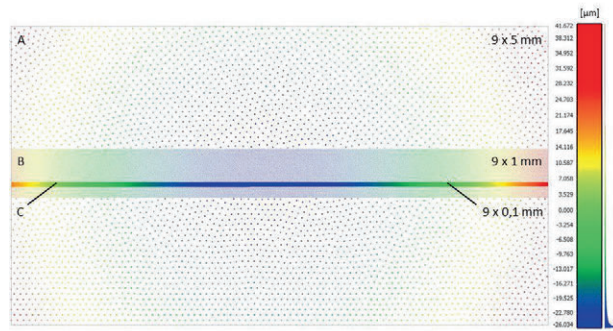
wirtschaftlicheren Konditionen angeboten werden als eine handelsübliche Kombination aus zwei Geräten zur Prüfung von Form und Rauheit.

Fazit

Das integrierte faseroptische Messsystem bietet eine zuverlässige und vor allem berührungsfreie Alternative zur taktilen Messung komplexer Optiken. Erstmals wird es mit der neuen Technologie möglich sein, optische Freiformflächen durch individuell programmierbare Scanbahnen in kurzen Prüfzeiten vollflächig abzutasten und nicht nur Formabweichungen, sondern auch Rauheitsparameter präzise und zerstörungsfrei auszuwerten.

Da die faseroptischen Sensoren nahezu oberflächenunabhängig arbeiten, kann das System Messungen auch auf Bauteilen aus anderen Materialien durchführen. Großer Vorteil ist bei allen Messungen die extrem kompakte Bauweise des Messkopfes mit einem Durchmesser von $\geq 80 \mu\text{m}$. Damit erreicht die Sensorik in Kombination mit der kinematischen Einheit auch Mikrobohrungen und andere schwer zugängliche Bauräume.

Bild 7: Verschiedene Messfelder unterschiedlicher Größe und Punktedichte (Testobjekt Asphäre). Dargestellt ist der Abstand zur z-Ebene in Mikrometern.



Realisierung des Messsystems

Im Verbundprojekt MaGeoOptik des Forschungscampus Digital Photonic Production (DPP) arbeiten die Firmen fionec und Aixtooling zusammen mit dem Fraunhofer IPT an der Steigerung der Leistungsfähigkeit von Strahlführungssystemen. Dazu werden Optiken mit neuartigen Materialien und Geometrien hergestellt und bewertet (Aixtooling/IPT). Zur hochgenauen Bestimmung der neuen Optiken erfasst ein faseroptisches Messsystem (fionec) in Kombination mit einer Präzisionskinematik (IPT) Form und Rauheit der Linsen.

Das Verbundprojekt läuft noch bis zum 30. September 2019 und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 1,7 Millionen Euro gefördert.

Kontakt

Dr. Frank Depiereux
Geschäftsführer
fionec GmbH
Ritterstraße 12 a
52072 Aachen
Tel. +49 (0)241 8949 8840
Fax +49 (0) 241 8949 8888
info@fionec.de
www.fionec.de



Kurt Rämer
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Tel. +49 (0)241 8904 417
Fax +49 (0) 241 8904 6417
kurt.raemer@ipt.fraunhofer.de
www.ipt.fraunhofer.de



Messsystem	Faseroptisches, kurzkohärentes Interferometer mit miniaturisierter Messsonde (d= 1,4 mm) zur Bestimmung von Form- und Rauheitsparametern [2]
Kinematik	Koordinatenmessgerät mit 3D-Längenmessabweichung nach ISO 10360: (0,75 + L/500) μm
Prüfobjekt	Konvexe Asphäre
Messstrategie	Parallel versetzte Linienscans
Größe der Messfelder	A= 9 x 5 mm ² / B= 9 x 1 mm ² / C= 9 x 0,1 mm ²
Abstand Messpunkte	A= 0,1 mm / B= 0,01 mm / C= 0,001 mm
Gesamtzahl der Messpunkte	A= 4.360 / B= 68.800 / C= 704.000

Tabelle 1: Parameter des Messaufbaus