Max Riediger* und Robert Schmitt

Optische Kohärenztomographie zur kombinierten Form- und Zentrierprüfung kleinaperturiger optischer Komponenten

Optical coherence tomography for combined form and centration measurement of small-aperture optical components

DOI 10.1515/teme-2018-0029

Zusammenfassung: Kleinaperturige optische Komponenten mit komplexer Form spielen zunehmend eine Rolle bei Sensing- und Imagingapplikationen. Die messtechnische Charakterisierung dieser Bauteile stellt jedoch noch immer eine Herausforderung dar. Es wurde ein auf optischer Kohärenztomographie basierendes Verfahren entwickelt, welches in der Lage ist, die Form- und Zentrierung beider Funktionsflächen kleinaperturiger Linsen mit nur einer Messung zu erfassen. Die Herausforderung stellt dabei die Messung der dem Messkopf abgewandten Funktionsfläche dar, da diese aufgrund der Lichtbrechung an der dem Messkopf zugewandten Funktionsfläche verzerrt gemessen wird.

Schlüsselwörter: Optische Kohärenztomographie (OCT), Optikprüfung, Asphäre, Bildverarbeitung.

Abstract: Complex-shaped small-aperture optical components increasingly play a role in sensing and imaging applications. However, their metrological characterization remains challenging. A measurement method was developed, which bases on optical coherence tomography to measure form and centration of both functional surfaces of small-aperture lenses with only one measurement. Key challenge is the measurement of the functional surface facing away from the measurement head since it is distorted due to the refraction of light on the functional surface that faces towards the measurement head.

Keywords: Optical coherence tomography (OCT), optics testing, aspheric lenses, image processing.

*Korrespondenzautor: Max Riediger, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Steinbachstraße 17, 52074 Aachen, E-Mail: max.riediger@ipt.fraunhofer.de

Robert Schmitt, Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen, E-Mail: r.schmitt@wzl.rwth-aachen.de

1 Einleitung und Motivation

Von der Handykamera über optische Koppler zur Kommunikation und Endoskopen in der Medizintechnik bis hin zur Sensorik im PKW leisten kleinaperturige optische Systeme einen Beitrag zu Sicherheit, Gesundheit und Komfort und in unserem Leben. Die optische Funktion solcher Systeme kann nur sichergestellt werden, wenn die Eigenschaften der einzelnen Komponenten den Herstellungsspezifikationen entsprechen. Maßgebliche Kriterien für die Güte eines optischen Systems sind die Form der optischen Funktionsflächen und ihre Lage zueinander [3].

Trotz zahlreicher auf dem Markt befindlicher Verfahrensvarianten sind die Möglichkeiten zur messtechnischen Charakterisierung von Form und Zentrierung kleinaperturiger optischer Komponenten aufgrund ihrer oftmals komplexen Oberflächenform limitiert oder nicht möglich [1]: Taktile Prüfverfahren können die Optiken beschädigen und sind langsam, scannende optische Verfahren wie Konfokalmikroskopie sind ebenfalls langsam, bei der Formprüfinterferometrie ist für die Messung komplex geformter Oberflächen der Einsatz ebenso komplexer Referenzflächen oder Computer-generierter Hologramme (CGHs) notwendig und Autokollimatoren liefern zwar Informationen über die Zentrierung – können aber nicht die Form messen.

In Ermangelung einer geeigneten Methode zur Prüfung der Einzelkomponenten werden aufwendige Funktionstests des Gesamtsystems durchgeführt. Dabei treten teilweise hohe Ausschussraten von bis zu 40 % [2] auf, die den industriellen Bedarf illustrieren und das wirtschaftliche Potenzial eines geeigneten Verfahrens zur messtechnischen Charakterisierung komplex geformter, kleinaperturiger Komponenten aufzeigen.

Im Folgenden ist ein auf optischer Kohärenztomographie (OCT) basierendes Prüfverfahren dargestellt, welches die zuvor angesprochenen Herausforderungen adressiert. Vorteil des Verfahrens ist die zerstörungsfreie Messung

optischer Komponenten mit nur einer Aufnahme, in der gleichzeitig beide Funktionsflächen erfasst werden. Weiterhin weist das Verfahren eine hohe Variabilität bezüglich der Prüflingsgeometrie auf, die es erlaubt, stark asphärische Komponenten oder Freiformflächen zu testen.

2 Messprinzip OCT

Die OCT ist ein Messverfahren zur tomographischen Untersuchung transparenter oder semitransparenter Materialien, welches auf kurzkohärenter Interferometrie basiert. Der typische Aufbau eines SD-OCTs (spectral domain OCT) ist in Abbildung 1 dargestellt. Kurzkohärentes Licht, typischerweise aus einer Superlumineszenzdiode (SLD) wird in einem Michelson-Interferometer auf eine Mess- und eine Referenzstrecke aufgeteilt. Die Überlagerung der Rückreflexe erzeugt eine spektrale Modulation, welche mit einem Spektrometer detektiert wird. Die Modulationsfrequenz wird durch die optische Weglängendifferenz zwischen Mess- und Referenzarm bestimmt. Durch eine Fourier-Transformation des Spektrums erhält man ein Tiefenprofil der Probe. Durch laterales Abscannen der Prüflingsoberfläche mit beweglichen Spiegeln und einem Scan-Objektiv werden mehrere Tiefenprofile zu einem Tomogramm kombiniert. Die Aufnahmezeit der Tiefenprofile liegt typischerweise im Bereich einiger kHz bis MHz [7].

Die axiale Auflösung einer OCT-Aufnahme wird durch die spektrale Breite der Lichtquelle bestimmt. Für ein gaußförmiges Spektrum mit der zentralen Wellenlänge λ und der spektralen Breite $\Delta\lambda$ beträgt die axiale Auflösung Δz [6]

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Die laterale Auflösung Δx ist unabhängig von der axialen Auflösung und wird durch die Punktgröße des verwendeten Objektivs bestimmt:

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{d} \quad (2)$$

Dabei ist f die Brennweite des verwendeten Objektivs und d der Durchmesser des auf das Objektiv treffenden kollimierten Strahls. Gleichung 2 gilt nur für die Brennebene des Objektivs; vor und hinter dem Fokus ergibt sich die laterale Auflösung entsprechend der Gauß'schen Strahlpropagation. Bei der Systemauslegung muss ein Kompromiss zwischen lateraler Auflösung und dem sinnvoll nutzbaren axialen Messbereich gefunden werden.

Abb. 1: Exemplarischer Aufbau eines SD-OCTs mit faseroptischen Komponenten.

3 Beschreibung des Messverfahrens

3.1 Segmentierung der Funktionsflächen

Zur OCT-basierten Form- und Zentrierprüfung, wird die zu untersuchende Linse im Durchstrahlverfahren mit dem OCT gemessen. Es entsteht ein Tomogramm, welches als $m \times n \times l$ -Matrix vorliegt. Der Wert jedes Voxels der Matrix entspricht der Intensität des zurückgestreuten Lichts aus dem korrespondierenden Volumen im Messbereich.

Zur Auswertung der Prüflingsgeometrie, ist eine Segmentierung der Funktionsflächen aus dem Tomogramm notwendig. Für die Segmentierung werden die lokalen Intensitätsmaxima $\hat{z}$ der Matrix ermittelt. Lokale Intensitätsmaxima, die sich aus dem Sensorrauschen ergeben und somit nicht Teil der Funktionsflächen sind, werden über eine Analyse der Anzahl und der Abstände der nächsten Nachbarn eliminiert. Um die Positionsgenauigkeit der Messpunkte in axialer Richtung zu verbessern, wird die Oberflächenposition mit Subpixelgenauigkeit berechnet. Dazu werden die Intensitätswerte in axialer Richtung in einem Intervall um das zuvor ermittelte Intensitätsmaximum mit einer Gauß'schen Funktion der Form

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{(z - \hat{z}_{sp})^2}{2\sigma^2}\right) + I_{noise} \quad (3)$$

gefitet. Dabei bezeichnet $\hat{z}_{sp}$ die Oberflächenposition des zu prüfenden Elements mit Subpixelgenauigkeit. Die n Punkte der Oberfläche werden als Punktwolke $P_n(x_n, y_n, z_n)$ gespeichert.

3.2 Rekonstruktion der Sekundärfläche

Aufgrund des Messprinzips wird die dem Messsystem abgewandte Seite (Sekundärfläche) des zu prüfenden optischen Elements durch das gesamte Element hindurch gemessen. Das bedeutet, dass an der dem Messkopf zugewandten Funktionsfläche (Primärfläche) Lichtbrechung auftritt. Außerdem besteht aufgrund des Brechungsindex des optischen Elements eine Differenz zwischen optischer und geometrischer Weglänge des Messstrahls. Brechung und optische Weglänge führen dazu, dass die gemessene Form der Sekundärfläche des optischen Elements im Tomogramm von der tatsächlichen geometrischen Form abweicht. Diese Abweichung kann mit Hilfe von Raytracing korrigiert werden (Abb. 2). Beim Raytracing werden die einfallenden Messstrahlen durch den Prüfling hindurch bis zur Sekundärfläche propagiert und an den Grenzflächen entsprechend des Snelliusschen Brechungsgesetzes gebrochen. Der Vektor der Strahlpropagation $\vec{T}$ nach Brechung an der Primärfläche berechnet sich zu

$$\vec{T} = \left(n_r \vec{N} \vec{I} - \sqrt{1 - n_r^2 \left(1 - (\vec{N} \vec{I})^2 \right)} \right) \vec{N} - n_r \vec{I}. \quad (4)$$

Dabei ist $\vec{I}$ der Einfallsvektor des Messstrahls, $\vec{N}$ der Normalenvektor der Primärfläche am Auftreffpunkt des Messstrahls und n_r der Kehrwert des Brechungsindex des optischen Elements bei der zentralen Wellenlänge des Messstrahls. Der Einfallsvektor $\vec{I}$ ist aus dem Messaufbau bekannt. Die Normalenvektoren $\vec{N}$ der Primärfläche können aus den gemessenen Oberflächendaten berechnet werden.

Zur Bestimmung der Normalenvektoren wird hier ein modellbasierter Ansatz gewählt, bei dem ein Oberflächenmodell der Form $f(x, y)$ (z.B. eine sphärische oder eine asphärische Fläche) an die Messdaten angepasst wird. Ist $f(x, y)$ eine differenzierbare Funktion, so ist $\left(-\frac{\partial f}{\partial x}(x, y), -\frac{\partial f}{\partial y}(x, y), 1\right)$ ein nach oben weisender Normalenvektor. Mit Hilfe dieser Beziehung werden die Normalenvektoren der Primärfläche an den Auftreffpunkten des Messstrahls bestimmt. Vorteil dieses Vorgehens ist – bei Kenntnis des der Oberfläche zugrunde liegenden mathematischen Modells – die Robustheit gegenüber Messungenauigkeiten.

Zur geomerischen Rekonstruktion der Punkte Q_n der Sekundärfläche werden die Punkte neu berechnet. Der Abstand l_n zwischen den Punkten Q_n der Sekundärfläche und den Punkten P_n der Primärfläche wird durch Differenzbildung bestimmt. Der Abstand l_n beschreibt die optische Weglänge. Um die gesuchte geometrische Weglänge l'_n zu erhalten, wird l_n durch den Brechungsindex

Abb. 2: Rekonstruktion der geometrischen Position eines Messpunkts auf der Sekundärfläche. Im OCT-Bild scheint der zum Messpunkt P_n (Primärfläche) gehörende Punkt der Sekundärfläche Q_n auf einer Geraden mit dem einfallenden Messstrahl $\vec{I}_n$ zu liegen. In Wirklichkeit wird der einfallende Messstrahl jedoch an der Primärfläche in Richtung $\vec{T}_n$ gebrochen.

geteilt. Die geometrischen Positionen der Messpunkte auf der Sekundärfläche Q'_n berechnen sich zu

$$Q'_n = P_n + l'_n T_n. \quad (5)$$

3.3 Formprüfung

Zur Prüfung der Spezifikationen des optischen Bauelements werden die gewonnenen Punktwolken von Primär- und Sekundärfläche mit Referenzdaten verglichen. Dazu bietet sich ein modellbasiertes vorgehen an. An die Punktwolke wird eine Fläche entsprechend eines mathematischen Modells angepasst. Für den Fall einer asphärischen Prüflingsoberfläche kann die Asphärengleichung entsprechend ISO 10110

$$z(r) = \frac{\rho r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(\rho r)^2}} + \sum_{i=2}^n A_{2i} \cdot r^{2i} \quad (6)$$

verwendet werden. Dabei ist z die Pfeilhöhe, r der Abstand senkrecht zur optischen Achse, ρ die Scheitelkrümmung, k die konische Konstante und A_{2i} die Asphärenkoeffizienten. Die Messdaten sind im Normalfall noch nicht im Koordinatensystem referenziert – sprich es liegt eine noch unbekannte kleine Rotation und Translation vor. Diese Rotation und Translation wird bei der Flächenanpassung berücksichtigt. Ein entsprechender Algorithmus zur Anpassung von Asphärenmodellen an Messdaten mit kleinen Rotationen und Translationen beschreibt Křen [4]. Mit Hilfe der Residuen der Flächenanpassung können die in der Optikprüfung gängigen PV- und RMS-Werte bestimmt werden.

3.4 Zentrierprüfung

Über die Bestimmung der Formparameter der Primär- und Sekundärfläche hinaus kann mit den Messdaten noch die Zentrierung der Flächen geprüft werden. Die dafür zu bestimmenden Größen sind der Keilwinkel und die Dezentrierung. Der Keilwinkel ist der Winkel, unter dem die optischen Achsen der beiden Funktionsflächen zueinander stehen und ist im Idealfall null. Die Dezentrierung ist der laterale Versatz des Linsenscheitels der Sekundärfläche bezüglich der optischen Achse der Primärfläche. Keilwinkel und Dezentrierung werden mit Hilfe des oben genannten Verfahrens zur Anpassung der Asphärenflächen aus den Differenzen der Rotationen bzw. Translationen von Primär- und Sekundärfläche bestimmt.

4 Test des Messverfahrens

Mit Hilfe eines handelsüblichen Tabletop-OCTs (Thorlabs Telesto Series) mit einer zentralen Wellenlänge von 1310 nm und einer axialen Auflösung von 6,5 μm in Luft wurde eine im Kunststoffspritzgussverfahren hergestellte kleinaperturige Asphäre vermessen. Mit Hilfe des beschriebenen Auswerteverfahrens konnten aus den Messdaten die Funktionsflächen der Linse durch Segmentierung rekonstruiert werden.

In Abb. 3 ist die Primärfläche, die angepasste Asphärenfläche (Referenzfläche) und die Differenz zwischen Primärfläche und Referenzfläche dargestellt. Die Parameter der Flächenanpassung der Referenzfläche finden sich in Tabelle 1. Der Durchmesser der Primärfläche beträgt $D = 2\text{ mm}$. Das RMS zwischen Primärfläche und Referenzfläche beträgt 0,9 μm bei einem PV von 14 μm .

Tab. 1: Parameter der an die Messdaten gefitteten Referenzflächen von Primär- und Sekundärfläche. Die Parameter entsprechen dem Asphärenmodell aus Gl. (6).

Parameter	Primärfläche	Sekundärfläche
R	-0,7617	2,9422
k	-1,0566	-4,0176
A_4	1,7292	0,0010
A_6	-5,1401	-0,0264
A_8	13,5427	0,1745
A_{10}	-24,4923	-0,5972
A_{12}	26,7997	1,1306
A_{14}	-15,7745	-1,1217
A_{16}	3,8019	0,4552

Abb. 3: Mess- und Referenzdaten der Primärfläche einer asphärischen Kunststofflinse mit Durchmesser $D = 2\text{ mm}$. Die Differenz aus Mess- und Referenzdaten weist ein RMS von 0,9 μm und ein PV von 14 μm auf.

In Abb. 4 ist die Sekundärfläche, die angepasste Asphärenfläche (Referenzfläche) und die Differenz zwischen Sekundärfläche und Referenzfläche dargestellt. Die Parameter der Flächenanpassung für die Referenzfläche finden sich in Tabelle 1. Der Durchmesser der Sekundärfläche beträgt $D = 1,52\text{ mm}$. Das RMS zwischen Sekundärfläche und Referenzfläche beträgt 1,3 μm bei einem PV von 14 μm . Die Werte von RMS und PV entsprechen weitestgehend den Werten der Primärfläche. Das bedeutet – unter Annahme, dass die Fertigungsgenauigkeit der Primärfläche und Sekundärfläche gleich ist – dass die Rekonstruktion der Sekundärfläche mit dem modellbasierten Ansatz hinreichend genau ist.

Die Prüfung der Zentrierung der Funktionsflächen der Linse ergab einen Keilwinkel von 0,12° bei einer Dezentrierung von 20 μm . Die Mittendicke wurde zu 54 μm bestimmt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein auf optischer Kohärenztomographie basierendes Verfahren zur Messung der Form und Zentrierung von kleinaperturigen Linsen entwickelt und an Messdaten mit einem handelsüblichen Tabletop-OCTs getestet. Die Form und Zentrierung beider Funktionsflächen konnten aus nur einer Messung ermittelt werden. Trotz einer nötigen Korrektur der Sekundärfläche aufgrund der Lichtbrechung an der Primärfläche konnte die Formgenauigkeit

Abb. 4: Mess- und Referenzdaten der Sekundärfläche einer asphärischen Kunststofflinse mit Durchmesser $D = 1,52$ mm. Die Differenz aus Mess- und Referenzdaten weist ein RMS von $1,3 \mu\text{m}$ und ein PV von $14 \mu\text{m}$ auf.

der Sekundärfläche mit ähnlicher Genauigkeit wie die der Primärfläche gemessen werden.

Zur weiteren Validierung des Verfahrens ist eine Vergleichsmessung mit einem im industriellen Umfeld etablierten Messverfahren nötig, um die Genauigkeit des OCT-basierten Verfahrens zu bestimmen. Dazu können beispielsweise Tastschnittgeräte eingesetzt werden. Die Genauigkeit kann anschließend durch die Entwicklung eines angepassten OCT-Messsystems mit hoher axialer Auflösung im Bereich von ca. $1\text{--}2 \mu\text{m}$ verbessert werden. OCT-Systeme mit entsprechender Auflösung wurden schon mehrfach in der Literatur erwähnt [5]. Das Erreichen industrierelevanter Messgenauigkeiten könnte im Zusammenspiel mit der potenziell hohen Geschwindigkeit der OCT das Verfahren zu einer Inline-Prozessintegration befähigen.

Danksagung: Die vorgestellten Arbeiten wurden von der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des MEF-Projekts ForAsKo² finanziert.

Literatur

- [1] R. Dorn und J. Pfund. Effiziente Qualitätssicherung mittels multifunktionaler Optikprüfung. *Photonik*, 46(1):30–33, 2015.
- [2] L. Hyeong-soo. Galaxy S5 faces dilemma with low lens production yield. *etnews - Korea IT News*, March 2014. URL <http://english.etnews.com/news/article.html?id=20140317200006>.
- [3] R. Krappig und R. Schmitt. Präzision und Sensorspezifikationen der wellenfrontbasierten Justage kleinaperturiger

optischer Systeme. *tm – Technisches Messen*, 83(4):182–191, 2016.

- [4] P. Kren. Robust and precise algorithm for aspheric surfaces characterization by the conic section. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 13(11), 2002.
- [5] B. Povazay, K. Bizheva, A. Unterhuber, B. Hermann, H. Sattmann, A. Fercher und W. Drexler. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 27(20):1800–1802, 2002.
- [6] E. Swanson, D. Huang, M. Hee, J. Fujimoto, C. Lin und C. Puliato. High-speed optical coherence domain reflectometry. *Opt. Lett.*, 17:151–153, 1992.
- [7] W. Wiesner, B. Biedermann, T. Klein, C. Eigenwillig und R. Huber. Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second. *Optics Express*, 18(14):14685–14704, 2010.