

Ultrapräzisionsgefertigte Freiformflächen für Anwendungen in planar integrierten optischen Systemen

Sebastian Stoebenau, Martin Amberg, Stefan Sinzinger
 Fachgebiet Technische Optik, Technische Universität Ilmenau
<mailto:sebastian.stoebenau@tu-ilmenau.de>

Aus der in das Substrat gefalteten optischen Achse planar integrierter freiraumoptischer Systeme resultiert die Notwendigkeit, asphärische Formflächen vorzusehen, um Wellenfrontaberrationen zu vermeiden. Entsprechende Korrektorelemente wurden mittels ZEMAX[®] entworfen, unter Anwendung des Ultrapräzisionsfräsens gefertigt und anschließend im Experiment erfolgreich getestet.

1 Einführung

Die Integration freiraumoptischer Systeme in einen monolithischen Aufbau unter Zuhilfenahme der hochgenauen Fertigungstechnologien der Mikro-technik führte zu der Vorstellung des Konzepts der sogenannten planar integrierten Freiraumoptik (*Planar Integrated Free-Space Optics* = PIFSO) [1]. Das wesentliche Merkmal dieser Systeme stellt die in ein transparentes Substrat gefaltete optische Achse dar. Das Licht propagiert dabei entlang eines Zickzackpfads zwischen den jeweils reflektiv beschichteten optischen Wirkflächen auf der Ober- und Unterseite des Substrats. Eine grundsätzliche Herausforderung bei dem Design solcher Systeme stellt die Gewährleistung einer ausreichend hohen Gesamteffizienz dar. Diese ist bei dem Einsatz ausschließlich diffraktiver optischer Elemente (DOEs) erheblich reduziert. Durch den Austausch einiger oder sogar aller DOEs gegen refraktive Elemente lässt sich die Effizienz deutlich steigern [2]. Sowohl der Wunsch nach komplexen optischen Funktionalitäten als auch die Notwendigkeit einer Korrektur von Abbildungsfehlern, die sich aus der verkippten optischen Achse ergeben, resultieren in der Forderung nach symmetriefreien asphärischen Freiformflächen. Deren Fertigung unter Anwendung unterschiedlicher Varianten der Ultrapräzisionsbearbeitung wurde bereits anhand verschiedener Bauteilklassen demonstriert [3]-[5]. Die Herstellung von Korrektorelementen für planar integrierte optische Systeme mittels Ultrapräzisionsfräsen ist Gegenstand dieses Beitrags.

2 Design und Simulation

Der Entwurf des Demonstrators orientiert sich an dem in Abb. 1 gezeigten prinzipiellen Aufbau. Das System besteht im Wesentlichen aus dem transparenten Substrat, diffraktiven Koppelgittern, einer verspiegelten Standard-Kataloglinse sowie einem flexiblen Modul an der Unterseite des Systems. Letzteres lässt sich als Planspiegel oder komplexeres optisches Bauelement ausführen und soll schließlich der Einbringung der Korrektorelemente

in den Strahlengang dienen. Diese können sowohl diffraktiv als auch refraktiv realisiert werden.

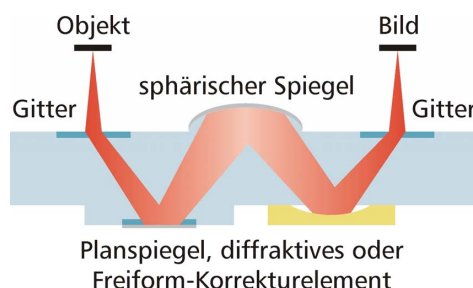


Abb. 1 Prinzipieller Aufbau des optischen Systems.

Die Nutzung des sphärischen Bauelements führt zu erheblichen Abbildungsfehlern (z.B. Astigmatismus). Um diese zu korrigieren, wurden mittels ZEMAX[®] zwei Korrektorelemente (ACEs) entworfen. Die erhaltenen Oberflächenprofile werden durch folgendes Polynom mit quadratischen, kubischen sowie gemischten Anteilen beschrieben:

$$z(x, y) = c_3 x^2 + c_5 y^2 + c_7 x^2 y + c_9 y^3. \quad (1)$$

Wobei die optische Funktionalität möglichst symmetrisch auf die beiden konkaven Elemente verteilt werden sollte. Daraus ergeben sich für die Koeffizienten in Gl. 1 die in Tab. 1 aufgeführten Werte.

Koeffizient	1. Element	2. Element
c_3	$-1,817 \cdot 10^{-3}$	$-1,816 \cdot 10^{-3}$
c_5	$-1,436 \cdot 10^{-3}$	$-1,507 \cdot 10^{-3}$
c_7	$-7,595 \cdot 10^{-5}$	$-7,546 \cdot 10^{-5}$
c_9	$-7,506 \cdot 10^{-5}$	$-7,492 \cdot 10^{-5}$

Tab. 1 Koeffizienten des Polynoms zur Beschreibung der Korrekturflächen

3 Fertigung

Das Fachgebiet Technische Optik der Technischen Universität Ilmenau betreibt im Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien mit der Kugler Micro-

gantry™ nano4X ein Ultrapräzisionsbearbeitungs-zentrum, in welchem die Bearbeitungsmodi Laser-ablation, UP-Fräsen und Flycutting integriert sind. Die Herstellung der jeweils 2,4 x 2,4 mm² großen Korrektur-elemente mit einer maximalen Profiltiefe von ca. 5 µm erfolgte mittels UP-Fräsen. Einer sogenannten Rasterstrategie folgend wurde ein mäanderförmigen Bahn entlang eines 5 µm x 5 µm Rasters (XY-Ebene) über das Messingsubstrat geführt. Die Steuereinheit der CNC-Maschine berechnet dabei simultan aus dem Polynom in Gl. 1 die jeweilige lokale Zustellung in z-Richtung.

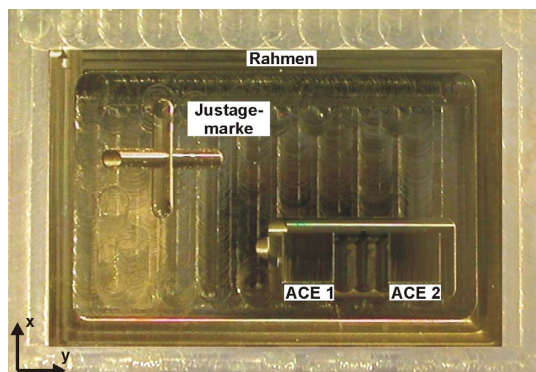


Abb. 2 Aufnahme des gesamten Korrekturmoduls.

Eine Gesamtansicht des Korrekturmoduls ist in Abb. 2 dargestellt. Neben den beiden Korrektur-elementen sind zu Justagezwecken zusätzliche Hilfsstrukturen bestehend aus Justagemarken und -rahmen in das Systemlayout integriert.

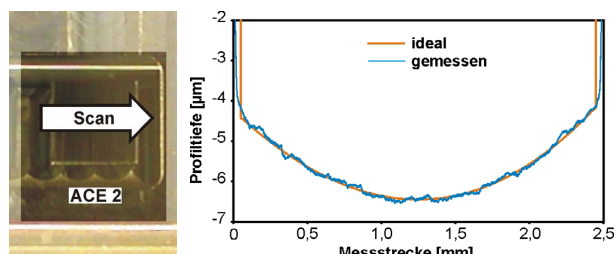


Abb. 3 Profilmeterscan des zweiten ACEs.

Abb. 3 zeigt anhand eines Profilmeterscans vergleichend die Ist- und Sollform des zweiten Korrektur-elementes. Demnach beträgt der arithmetische Mittenrauwert $R_a < 40$ nm bei einer maximalen Formabweichung von $< 200 \dots 400$ nm.

4 Experimente

Zur Verifikation der optischen Funktionalität der Korrektur-elemente wurde der Aufbau nach Abb. 1 um zwei wesentliche Bestandteile erweitert – eine monomodige Lichtleitfaser als quasi-punktförmige Lichtquelle in der Objektebene, in die Licht eines HeNe-Lasers ($\lambda = 632,8$ nm) eingekoppelt wurde, sowie eine CCD-Kamera mit vorgeschaltetem Mikroskopobjektiv zur Beobachtung der Bildebene.

Zunächst wurde das unkorrigierte System charakterisiert, bei dem anstelle des Korrekturmoduls ein einfacher Planspiegel eingesetzt wurde. Wie in Abb. 4 ersichtlich wird, lassen sich durch ein Verschieben der Beobachtungsebene entlang der optischen Achse u.a. die stark astigmatischen Ab-bildungsfehler nachweisen.

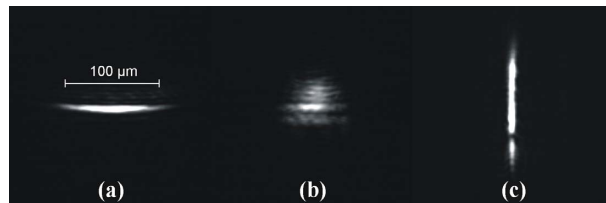


Abb. 4 Spotbilder des unkorrigierten Systems in der Ebene minimaler Konfusion (b) bzw. dazu um $\Delta z = +500$ µm (a) und $\Delta z = -500$ µm (c) verschobenen Ebenen.

Verglichen hierzu führte der Einsatz des Korrekturmoduls zu einem deutlich verringerten Spot-durchmesser von ca. 15 µm, dargestellt in Abb. 5.

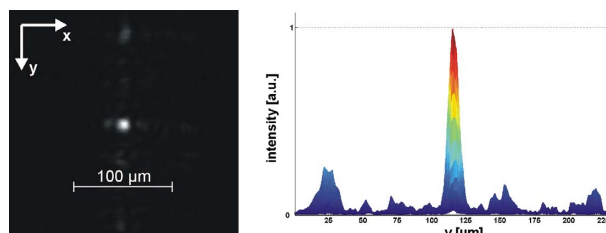


Abb. 5 Spotbild des refraktiv korrigierten Systems.

5 Zusammenfassung

Die mittels ZEMAX® entworfenen und unter Anwendung des Ultrapräzisionsfräsens gefertigten Korrektur-elemente konnten in umfangreichen Experimenten erfolgreich bezüglich ihrer optischen Funktionstüchtigkeit charakterisiert werden. Verglichen mit dem unkorrigierten System ergibt sich eine deutlich verbesserte Abbildungsqualität.

Literatur

- [1] J. Jahns, A. Huang: „Planar integration of free-space optical components“ in: *Appl. Opt.* **28**(9), 1602-1605 (1989)
- [2] M. Amberg, S. Sinzinger: „Design considerations for efficient planar-optical systems“ in: *Opt. Commun.* **267**, 74-78 (2006)
- [3] A.Y. Yi, T.W. Raasch: „Design and fabrication of a freeform phase plate for high-order ocular aberration correction“ in: *Appl. Opt.* **44**(32), 6869-6876 (2005)
- [4] S. Stoebenau, M. Amberg, S. Sinzinger: „Ultraprecision micromilling of freeform optical elements for planar microoptical systems integration“ in: *Proc. SPIE* **6992**, 699207 (2008)
- [5] E. Brinksmeier, L. Autschbach: „Ball-end Milling of Free-form Surfaces for Optical Mold Inserts“ in: *Proc. ASPE Annual Meeting*, Orlando, USA (2004)