



Andreas Gebhardt

Einleitung

Das Diamantdrehen auf der Grundlage ultrapräziser Maschinenteknik (Abb. 1) ist eine eingeführte Technologie zur Herstellung rotationssymmetrischer Optikkomponenten. Klassische Einsatzfelder sind Metallspiegel und Kristalloptik für den Infrarotbereich. Breiten Einsatz findet dieses spannende Verfahren auch bei der Kunststoffoptikfertigung. Hierbei werden sowohl Prototypen direkt in das optische Material geschnitten als auch die Werkzeuge zum Prägen und Spritzgießen hergestellt. Bei all diesen Beispielen handelt es sich überwiegend um makroskopische Optikelemente, deren Form weitgehend identisch mit den durch klassische Optikfertigung herstellbaren Bauteilen ist. Mittels Diamantdrehen können komplexe, programmgesteuerte Geometrien erzeugt werden, die bezüglich Kontur und Strukturfeinheit über die konventionellen Möglichkeiten hinausgehen.

Die Forschungen im IOF auf dem Gebiet der Ultrapräzisionsbearbeitung sind auf folgende Schwerpunkte gerichtet:

- Entwicklung von Bearbeitungstechnologien zur Herstellung mikrooptischer Strukturen
- Ultrapräzise Fertigung von Replikationswerkzeugen
- Generierung komplexer optischer Flächen (asphärisch, nicht-rotationssymmetrisch und Freiformflächen).

Miniaturisiertes Drehen

Eine erste Möglichkeit zur Herstellung von Mikrooptiken durch Diamantdrehen ist die Miniaturisierung des klassischen Drehvorgangs. Es handelt sich um rotationssymmetrische Sphären oder Asphären mit Durchmessern < 3 mm. Das Bauteil befindet sich im Drehzentrum, die Bauteilkontur wird durch die X-Z Maschinenbewegung in der Werkzeugebene erzeugt.

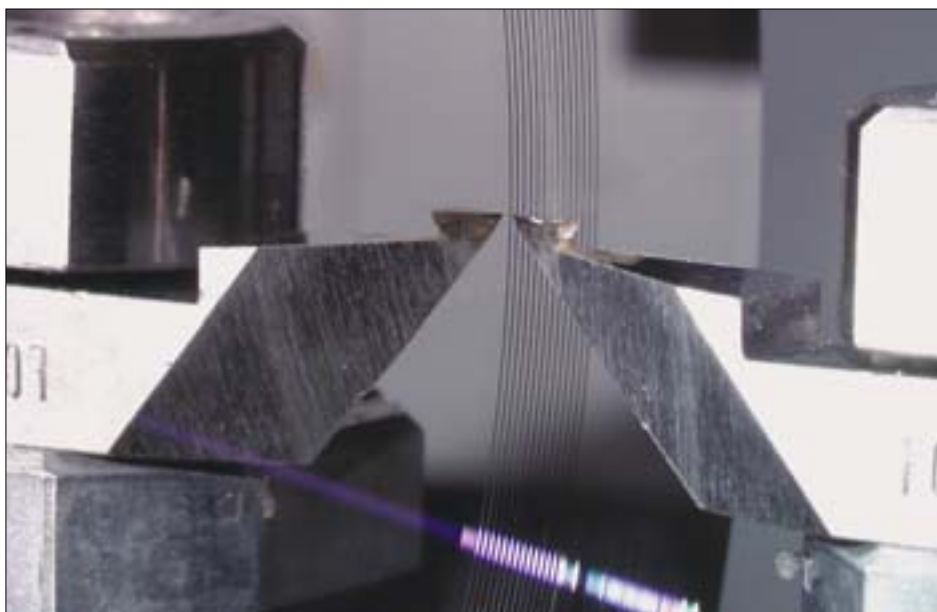


Abb. 1:
Diamantdrehen einer Gitterstruktur,
Material: chemisch Nickel.

Fig. 1:
Diamond turning of a grating structure,
material: electroless Nickel.

Diamond turning of micro-optical structures

Andreas Gebhardt, Ralf Steinkopf

Introduction

Single point diamond turning (SPDT) based on ultra precision machines is a well known technique for manufacturing rotationally-symmetrical optics. Classical applications are metal mirrors and crystal optics for infrared wavelengths. An important implementation of this cutting method is the manufacture of plastic optics. Cutting prototypes is as common as the manufacture of replication tools for injection moulding or hot embossing. All these examples deal with macroscopic optics, the shapes of which are widely similar to optics made by classic optic manufacturing. However the possible use of SPDT to produce complex, CNC-programmed geometries which exceed the limits of optically produced elements with respect to their shape and micro-structure is currently the focus of much research.

The research at Fraunhofer IOF in the field of ultra precision machining is focused on:

- Development of machining technologies for the manufacturing of micro-optical structures
- Ultra precise manufacturing of moulds
- Generation of complex optical surfaces (aspherical, non-rotationally symmetrical, freeform).



Ralf Steinkopf

Miniaturized turning

One possibility for making micro-optics with SPDT is miniaturized turning. Spheres or aspheres with diameters less than 3 mm can be created. The component is arranged at the turning center and the shape is realized by the X-Z movement in the tool-plane.

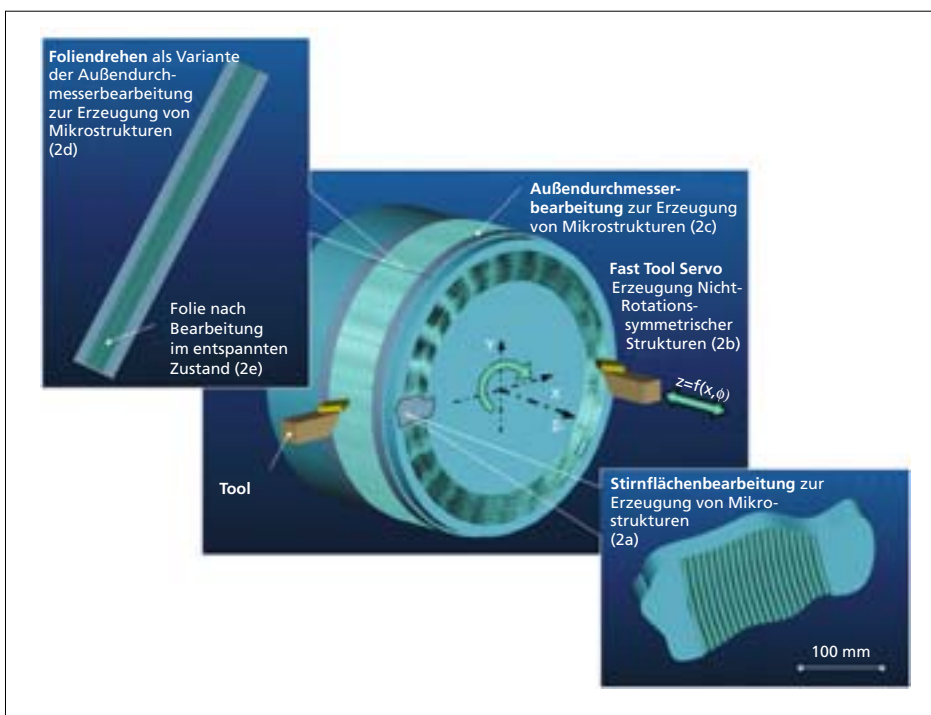


Abb. 2: Diamantdrehen mikrooptischer Strukturen: Herstellungsvarianten.

- Fig. 2: Diamond turning microoptical structures: machining versions.
- 2a: Face-turning of microprofiles.
 - 2b: Fast Tool Servo Manufacturing of non-rotationally symmetric structures.
 - 2c: Microstructuring of the circumference.
 - 2d: Foil turning as a option of structuring the circumference.
 - 2e: Foil after manufacturing.

Diese Technologie erlaubt die Herstellung von Einzellinsen und von arrayförmigen Anordnungen. In diesem Fall wird das Substrat justierbar auf der Spindel angeordnet und das jeweils zu bearbeitende Lenslet auf die Spindelmitte justiert. In die refraktive optische Fläche können zusätzlich auch diffraktive Elemente im gleichen Bearbeitungsprozess eingearbeitet werden. Auf Grund der kleinen Bauteildurchmesser und der oftmals gleichzeitigen starken Krümmung muss mit Werkzeugen mit minimalem Schneidradius oder Halbradiuswerkzeugen und kleinem Spitzen- und Freiwinkel gearbeitet werden.

Auch bei dieser Verfahrensvariante steht das Erreichen einer möglichst hohen Formgenauigkeit und damit die Minimierung der Abbildungsfehler im Fokus der Prozessoptimierung. In einem iterativen Verfahren wird die Korrektur der zunächst fehlerbehafteten Form durchgeführt. Nach der

Einrichtung des Werkzeuges anhand einer interferometrisch auswertbaren Sphäre wird nach einem ersten Bearbeitungsschritt ein best fit der tatsächlich gefertigten Asphäre durchgeführt. Der Offset der gefundenen Asphärenparameter wird als Korrektur in die Generierung des CNC-Programms eingearbeitet. Bei der weiteren Bearbeitung kann mit korrigiertem Programm die Formgenauigkeit schrittweise auf die gewünschte Toleranz gebracht werden. Abb. 3 zeigt in PMMA gedrehte Einzellinsen eines Mikroobjektivs für eine Miniaturkamera. Die asphärischen Linsenflächen weisen eine Formabweichung $< 0,5 \mu\text{m}$ auf.

Zur Charakterisierung der Abbildungsqualität der Mikrolinsen wurde die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) des Gesamtobjektivs ermittelt. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung der Simulationsrechnung (ZEMAX) mit den gemessenen Objektivdaten festgestellt werden (Abb. 4) /1/.

Off-Axis-Bearbeitung

Eine zweite Möglichkeit der Herstellung von mikrooptischen Strukturen ist die außeraxiale Bearbeitung eines Substrates /2/. Ähnlich einer Schallplatte werden die Strukturen spiralförmig in möglichst großem Abstand von der Drehmitte eingearbeitet (Abb. 2). Die Strukturen können sowohl durch die programmierte Werkzeugbahn als auch durch den direkten Übertrag des Werkzeugprofils erzeugt werden. Die sich durch den Abstand zur Spindelmitte ergebende Krümmung senkrecht zum Profil ist für viele Anwendungen vernachlässigbar bzw. kann im Optikdesign vorausschauend kompensiert werden. Somit ist eine effiziente Herstellung von zylindrischen Konturen mit asphärischem Profil möglich, wobei das Profil von Rille zu Rille variieren kann. Beispielhaft zeigt Abb. 5 ein durch UV-Reaktionsguss repliziertes Zylinderlinsenarray mit hyperbolischem Linsenquerschnitt. Das Linsenarray wurde als strahlformendes Element in einem optischen Mikrofon /3/ verwendet und zeigt gegenüber sphärischen Arrays eine Steigerung der Koppeffizienz um den Faktor 3.

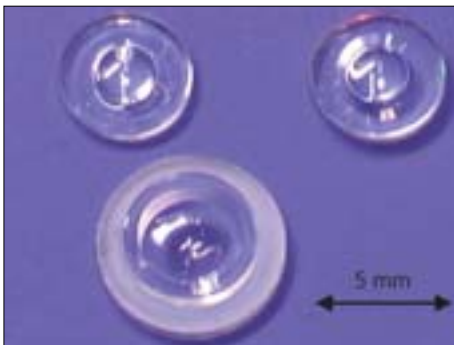


Abb. 3: Diamantgedrehte Mikrolinsen, Material PMMA.

Fig. 3: Diamond turned micro lenses, material: PMMA.

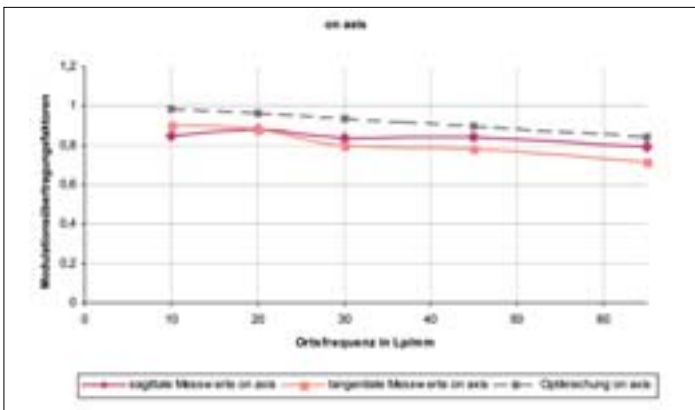


Abb. 4: Modulationsübertragungsfunktion des gedrehten Mikroobjektivs im Vergleich zur Simulation.

Fig. 4: MTF of the turned micro objective versus simulation.

This technique permits the manufacturing of lenses and lens arrays. The substrate in the latter case is adjustably mounted to align every lenslet in the spindle center. Diffractive elements can be added to the refractive optical surface. Due to the small diameter and the typically steep curvature, it is necessary to use small radius or split radius tools with an acute tool-tip angle and a small clearance angle.

Using this turning technique the objective is to construct the most accurate form possible, thereby minimizing aberration. In an iterative process incorrect surface shape must be corrected. After the initial tool setup by means of an interferometrically verified sphere, the real part will be measured and a best fit made. The offset of the calculated asphere parameters is used to correct the CNC-Program. Repeated machining with the rectified program produces a form close to the postulated tolerance.

Fig. 3 shows micro lenses (PMMA) of a micro camera objective made by this technique. The aspherical lenses exhibit a form-accuracy superior to 0.5 microns. To characterize the lens aberration the Modulation Transfer Function (MTF) of the objective was investigated. In this respect good correspondence of the simulation (ZEMAX) to the measured values was observed (Fig. 4) /1/.

Off-axis turning

A second possibility for micro-structuring is off-axis turning /2/. The structures are cut in a spiral groove as far as possible from the spindle axes, like a vinyl record (fig. 2). The shape of the structure is made by the programmed tool path or by copying the profiled tool directly onto the material. The curvature perpendicular to the profile is negligible for a lot of applications or can be anticipated and compensated by the optical design. With this method very efficient manufacture of cylindrical contours with an aspherical profile is possible even if the profile changes with every groove.

As an example fig. 5 shows a cylindrical lens array with its hyperbolic profile replicated using UV-reaction moulding. This array is used in an optical microphone /3/. In comparison with a spherical lens array the hyperbolic array increases the coupling efficiency by a factor of 3.

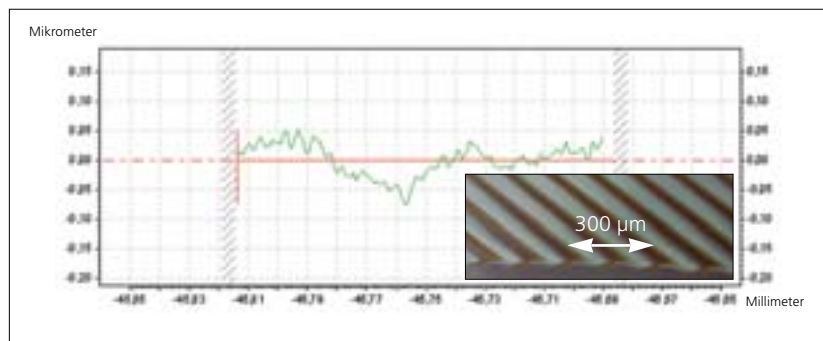


Abb. 5:
Abgeformtes Zylinderlinsenarray
und Formabweichung einer Einzellinse
(Tastschnittmessung).
Form: hyperbolisch,
Pitch: 150 µm, Sag 22 µm,
Füllfaktor > 99 %,
Formgenauigkeit < 250 nm,
Rauheit: RMS < 10 nm

Fig. 5:
Replicated cylindrical lens array and
form deviation of single lenslet
(tactile measurement).
Shape: hyperbolic,
Pitch: 150 µm, Sag 22 µm,
fill factor > 99 %,
Form accuracy < 250 nm,
Roughness: RMS < 10 nm

Ebenso können Beugungsgitter mit veränderlicher Gitterkonstante und Blazewinkel erzeugt werden. Die minimalen Strukturgrößen werden durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge limitiert, wobei Strukturbreiten von wenigen Mikrometern bei Höhen im Sub-Mikrometer-Bereich realisierbar sind (Abb. 6).

Strukturierung von Zylinderflächen

Eine ähnliche Vorgehensweise wie bei der Off-Axis-Bearbeitung ist auch für die Strukturierung einer Zylinderfläche möglich. Hierbei erhält man ein ringförmig umlaufendes Profil. Durch die Verwendung einer Folie können (trotz des Drehprozesses) lineare Mikrostrukturen erzeugt werden. Die auf der Mantelfläche des Zylinders aufgebraute Substratfolie wird nach erfolgter Strukturierung gelöst und auf einen ebenen Träger aufgebracht.

Fast Tool Servo

Mit den bisher beschriebenen Technologien wird die Bauteilkontur durch eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug unabhängig von der Rotationsbewegung des Werkstücks erzeugt. Ein zusätzlicher Freiheitsgrad kann durch ein synchron zur Spindelbewegung angetriebenes Werkzeug erschlossen werden. Diese so genannte Fast Tool Servo-Technologie (FTS) ermöglicht eine Strukturierung der Werkstückoberfläche entlang des spiralförmig verlaufenden Werkzeugweges. Innerhalb der Limitierungen für den Hub des FTS-Systems und der maximalen Frequenz der spindel-synchronen Werkzeugbewegung können somit nicht-rotationssymmetrisch strukturierte Flächen erzeugt werden (Abb. 7).

Zusammenfassung

Das Potential der Ultrapräzisions-Diamantbearbeitung wird insbesondere vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Anforderungen aus dem Optikdesign interessant. Das Diamantdrehen erlaubt die flexible Fertigung von Mikrogeometrien mit Strukturbreiten ab wenigen Mikrometern und Strukturweiten bis in den Sub-Mikrometerbereich und erschließt damit, in Ergänzung zu lithographischen Verfahren, eine Vielzahl von neuen Applikationen.

Spiegelträger aus NE-Metall sowie refraktive Optik- und Mikrooptikbauteile aus optischen Kunststoffen sind eine Domäne dieser Technik. Mit dem im IOF zur Verfügung stehenden Equipment sind außerdem Freiformflächen, Gitterstrukturen und andere Mikroprofile direkt für optische Bauteile oder als Abformwerkzeuge für die präzise Kunststoffabformung generierbar.

Literatur:

- /1/ Schalm, N.: „Entwicklung eines Messplatzes zur Bestimmung der Abbildungsqualität von miniaturisierten Kameraobjektiven“, Diplomarbeit, Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik 2003.
- /2/ Brinksmeier, E.; Stern, R.: „Fertigung und Anwendung ultrapräziser Mikrostrukturen“, 10. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Vulkan Verlag, Braunschweig, S. 6.1 ff, 2002.
- /3/ Schreiber, P.: „Optisches Mikrofon“ im gleichen IOF-Report.

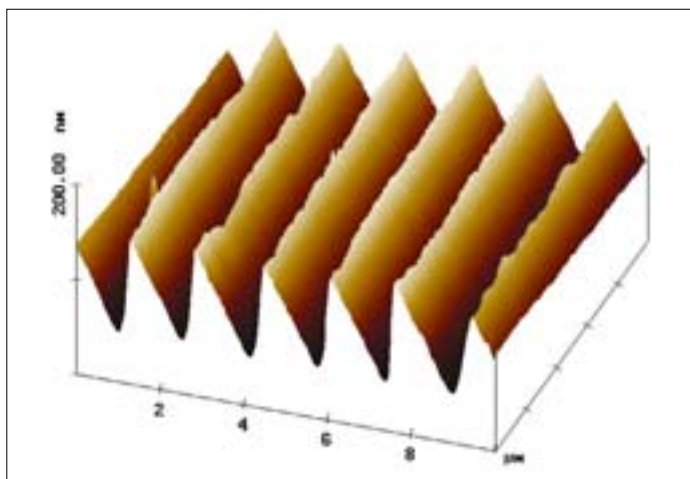


Abb. 6: Diamantgedrehte Gitterstruktur, Material Ampcoloy, AFM-Aufnahme.

Fig. 6: Diamond turned grating structure, material Ampcoloy, AFM-image.

In the same way the generation of diffraction gratings with variable pitch and blaze angle are possible. The available tools limit the minimum dimensions of the structure, however structure widths of a few microns and depths within the sub-micron range can be realized (fig. 6).

Structuring the circumference

A similar procedure is also applicable for machining the circumference of a work piece. In this case a circulating profile is created. Structuring the cylinder has the advantage that, with the use of a foil, linear structures are possible. The foil, plated on the cylinder surface, will be peeled off after the structuring and bonded onto a planar substrate.

Fast Tool Servo

The technologies described create the surface contour by the relative movement between work piece and tool, independent from the rotation of the work piece. An additional degree of freedom can be achieved by the use of a tool driven synchronously with the spindle rotation. This technique, known as Fast Tool Servo (FTS), permits the structuring of the work piece surface along the spiral tool path. Inside the stroke limits of the FTS and the maximum frequency of the spindle-synchronous tool movement, turning of non-rotationally symmetrical structured shapes are possible (fig. 7).

Conclusion

The capability of SPDT is especially interesting against a background of growing demands in optic design. SDPT permits the flexible manufacturing of micro-geometries with structure widths of some microns and structure depths within the sub-micron range. In addition to existing lithographic techniques it opens up a wide range of new applications.

Mirror substrates made of non-ferrous materials, as well as refractive optics and micro-optics made of plastics, is another area in which this method can be applied. With the IOF equipment the generation of freeform surfaces, diffraction gratings and micro-profiles directly for optical components or as moulds for precise plastic replication will be possible.

References:

- /1/ Schalm, N.: „Entwicklung eines Messplatzes zur Bestimmung der Abbildungsqualität von miniaturisierten Kameraobjektiven“, diploma thesis, Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik 2003.
- /2/ Brinksmeier, E.; Stern, R.: Fertigung und Anwendung ultrapräziser Mikrostrukturen. 10. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Vulkan Verlag, Braunschweig, S. 6.1 ff, 2002.
- /3/ Schreiber, P.: „Optisches Mikrofon“, in this report.

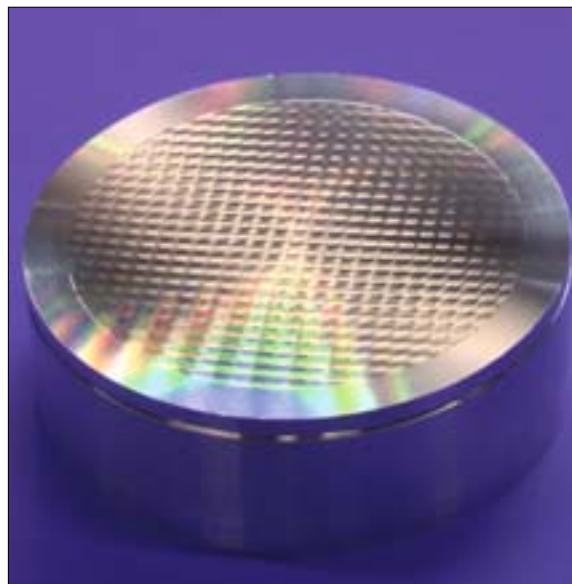


Abb. 7:
Facettenspiegel, FTS-Bearbeitung, Durchmesser 120 mm.

Fig. 7:
Faceted mirror, FTS-machined, diameter 120 mm.