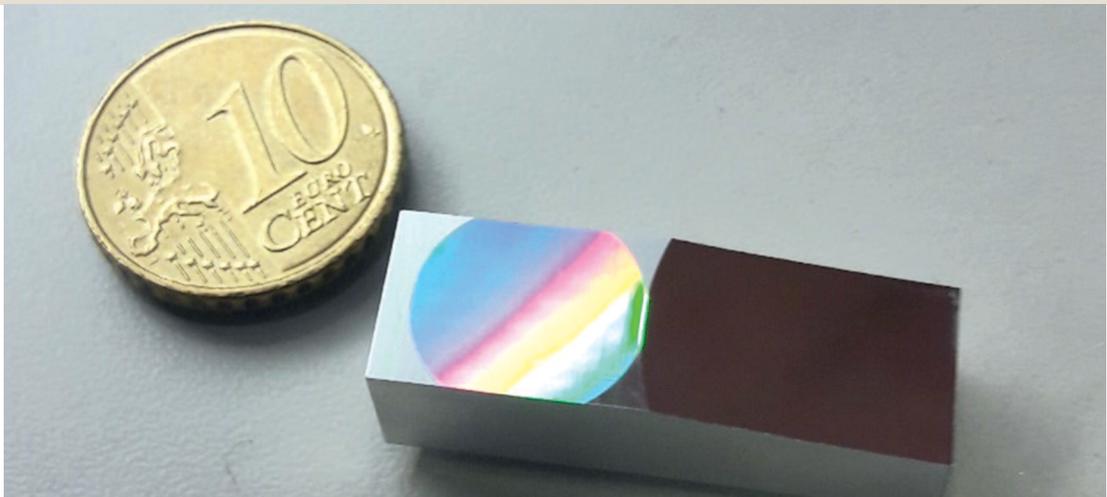


Ultrapräzise Maschinen für hybridoptische Elemente

Gekrümmte **DIFFRAKTIVE** Optiken werden zur Miniaturisierung spektroskopischer Systeme eingesetzt, die Herstellung der Replikationsmaster ist jedoch langwierig und kostenintensiv. Mehr Freiheiten im optischen Design bietet die flexible Ultrapräzisionszerspanung, sie erfordert allerdings die präzise Beherrschung von Maschine und Prozess.

Bild 1. Monolithisch integrierte Optik in Aluminium-RSA: konkav gekrümmtes Beugungsgitter und Toroidspiegel



KURT HASKIC UND DIRK OBERSCHMIDT

Als Teil der optischen Analytik ist die optische Spektroskopie eine Querschnittstechnologie verschiedener Wachstumsmärkte, darunter die Medizin- und Energietechnik sowie die Luft- und Raumfahrttechnik. Der bestehende Trend zur Miniaturisierung bei gleichzeitiger Erhöhung der funktionalen Integrationsdichte, kombiniert mit einer steigenden Individualisierung und einem zunehmenden Kostendruck, erfordert flexible Fertigungsmethoden, die den hohen Qualitätsansprüchen der optischen Analytik genügen.

Steigende Anforderungen an miniaturisierte Hybridoptiken

Durch die zunehmende Individualisierung und Dezentralisierung spektroskopischer Messgeräte steht dem Markt ein Wandel bevor, der einen steigenden Bedarf an kompakten Spektrometer-Subsystemen und -Komponenten generiert. Neben einer Volumenreduzierung besteht die Forderung nach Erhalt der Messfähigkeit bei gleichzeitiger Kostenminimierung.

Spektrometer bestehen aus mindestens einem optischen Gitter sowie abbildenden Elementen zur Strahlformung. Für eine hohe Effizienz werden oftmals Blazegitter mit dreieckiger Geometrie der

Mikrostrukturen eingesetzt. Mithilfe gekrümmter Beugungsoptiken, die abbildende und dispergierende Eigenschaften vereinen, werden kompaktere optische Designs mit einer reduzierten Grenzflächenzahl realisiert, wodurch die Miniaturisierung bei gleichbleibender Effizienz begünstigt wird. Derartige Optiken sind aufwendige Einzelanfertigungen, die als

> KONTAKT

HERSTELLER

LT Ultra-Precision Technology GmbH

88634 Herdwangen-Schönach

Tel. +49 7552 40599-0

Fax +49 7552 40599-50

www.lt-ultra.de

Carl Zeiss Jena GmbH

Abteilung Mikrostrukturierte Optik

07745 Jena

Tel. +49 3641 643851

www.zeiss.com/carl-zeiss-jena

FORSCHUNGSEINRICHTUNG

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Mikro- und Feingeräte

10587 Berlin

Tel. +49 30 314-22006

www.mfg.tu-berlin.de

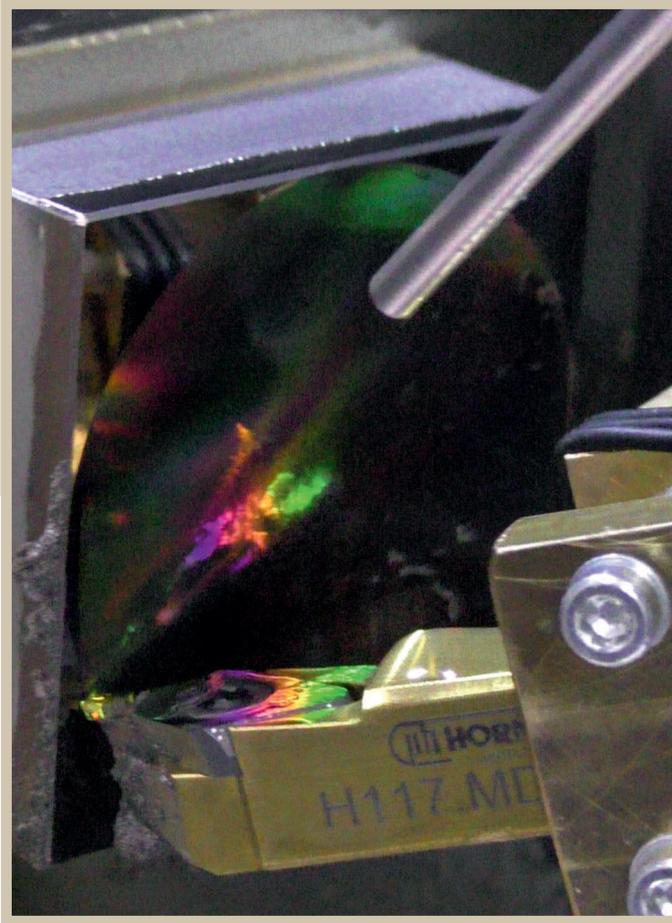


Bild 2. Hobeln einer Hybridoptik in Nickel-Phosphor (NiP)

High-End-Produkt direkt verwendet werden oder durch Replikation von Masterstrukturen Massenkörpers erschließen können. Die Herstellung der Einzeloptiken und der Masterstrukturen kann komplementär durch Ultrapräzisionsfertigung oder lithografische Verfahren erfolgen.

Die Herstellung von Blazegittern durch Ultrapräzisions-(UP-)Fertigungstechnologien bietet wesentliche Vorteile für die Auslegung von Hybridoptiken. Die Technologie ermöglicht einerseits die individuelle Linienführung mit einer gesteigerten Anzahl an Frei-

heitsgraden. Andererseits können Formnetze für die Replikation direkt gefertigt werden. Das bedeutet nicht nur einen Fortschritt für individuelle Anwendungen, sondern bereitet auch den Weg von der aufwendigen Einzelanfertigung derartiger Optiken zur prozesssicheren Replikation für hochauflösende Spektrometer (**Bild 1**). Die hierfür notwendigen Erweiterungen und Anpassungen der Maschinen- und Prozesstechnik an die speziellen Anforderungen optischer Gitter wurden in enger Zusammenarbeit der Unternehmen LT Ultra-Precision Technology und Carl Zeiss Jena sowie der Technischen Universität Berlin innerhalb eines BMBF-geförderten Forschungsprojekts entwickelt.

Die mechanische Mikro- und Nanobearbeitung

Je nach spektralem Anwendungsbereich der Optik kommen umformende oder spanende Fertigungsverfahren zum Zuge. Die einzelnen Furchen werden durch Relativbewegung des Werkzeugs auf geraden

IGUANA

Evolution 2.0 - Spiralisierung inklusive



www.zecha.de



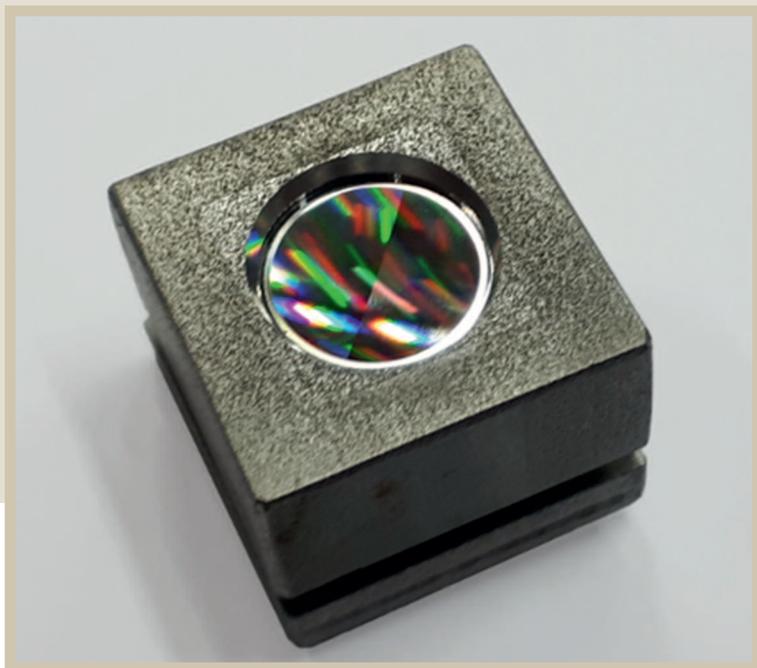


Bild 3. Gekrümmtes, diametral geteiltes Gitter in NiP, das zwei Spektralbereiche abdeckt und als Werkzeug-einsatz zur Replikation genutzt werden kann

oder gekrümmten Bahnen in das Substrat eingebracht. Durch wiederholten inkrementellen Versatz des Werkzeugs entsteht die diffraktive Oberfläche des Gitters. Die Werkzeuge sind monokristalline Diamanten und müssen höchsten Ansprüchen genügen.

Bei der umformenden Bearbeitung durch Furchen wird das monokristalline Diamantwerkzeug mit einer definierten Kraft auf die Oberfläche des Gitterrohrlings gedrückt. Diese wird dadurch plastisch verformt, sodass die projizierte Werkzeuggeometrie die Form der Gitterfurchen bildet. Die Ausrichtung des Werkzeugs sowie die eingestellte Kraft unterliegen engen Toleranzen. Hierfür wurden von der TU Berlin die benötigten Parametermodelle aufgestellt und ein

Bild 4. Ultrapräzisionsfräsmaschine (UP-Fräsmaschine) ›Typ MMC 900H‹ von LT Ultra-Precision Technology



spezielles Modul zur Justierung der Furchwerkzeuge entwickelt. Dieses ist auf Basis von Festkörpergelenken realisiert. Die Kraftkonstanz wird wahlweise durch Präzisionsgewichte oder Tauchspulenaktoren bereitgestellt. Zur Winklereinstellung wird ein eigenentwickeltes Lasertriangulationsmodul eingesetzt.

Eine Alternative zum Umformen ist das Hobeln oder Stoßen der Gitterfurchen mit einer definierten Werkzeugbewegung (Bild 2). Die verwendeten Werkzeuge sind Diamanten mit einer präzise gefertigten Profilkante. Die weggesteuerte Fertigung zeichnet sich durch vergleichsweise große Prozessfenster und damit hohe Designfreiheiten aus, stellt jedoch extrem hohe Anforderungen an die Schwingungsdämpfung, die Temperaturstabilität und die Prozessführung. Dies gilt insbesondere für die Vermeidung von Schäden durch ablaufende Späne beziehungsweise Aufbauschneiden.

UP-Bearbeitung mit hoher Materialvielfalt

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der UP-Technologie ist die Materialvielfalt. Stromlos abgeschiedenes Nickel-Phosphor beispielsweise ist röntgenamorph und eignet sich für den Formenbau (Bild 3). Je nach Spektralbereich können auch Einzelfertigungen für die Luft- und Raumfahrttechnik in Schichten aus Gold oder Aluminium gefertigt werden. Die material-spezifischen Prozessparameter für die Gitterfertigung wurden von der TU Berlin durch Zerspanungsversuche und begleitende Simulation bestimmt. Zum Aufbau der Simulationsumgebung auf Basis eines Johnson-Cooke-Modells wurden die Materialparameter durch experimentellen Abgleich angepasst und anhand von gemessenen Kraftkurven von Realversuchen validiert.

Beschichtete Optiken neigen bei thermischer oder mechanischer (Wechsel-)Belastung zur Delaminierung der optischen Funktionsschicht, sodass unter diesen Randbedingungen monolithische, homogene Elemente bevorzugt werden. Im sichtbaren Spektralbereich bieten sich aufgrund des hohen Reflexions-

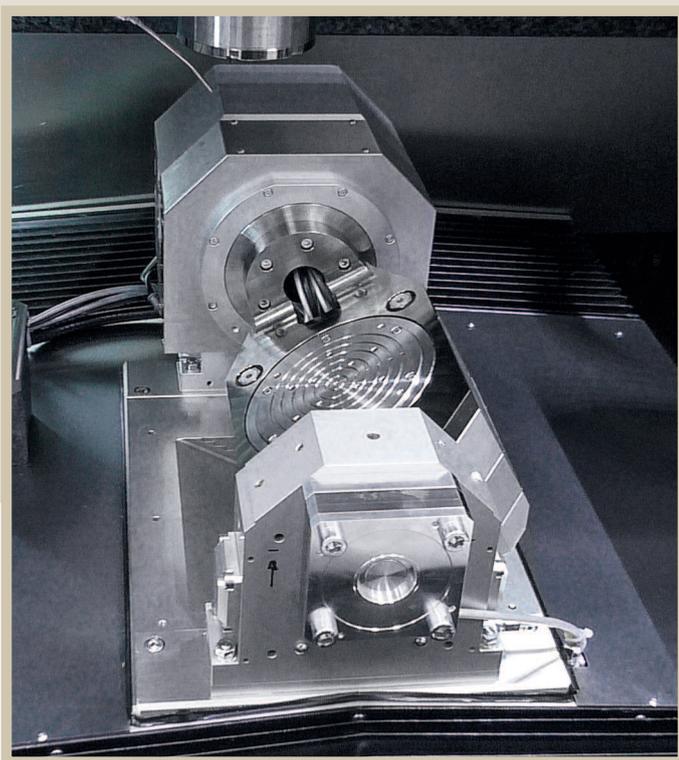


Bild 5. UP-Kipp-Schwenkeinheit für die 5-Achs-Simultanbearbeitung von LT Ultra-Precision Technology

koeffizienten Aluminiumlegierungen an. An der TU Berlin wurden erzeugte Gittergeometrien in verschiedenen feinstkörnigen RSA-Aluminiumlegierungen untersucht. Im Ergebnis stehen optimierte Bearbeitungsparameter zur Verfügung. Dadurch entfällt die Beschichtung der Optik, und es können auch weitere optisch wirksame Oberflächen, beispielsweise Spiegel, integriert werden. Die optischen Elemente können somit ohne Umspannvorgänge gefertigt werden, sodass Positionsgenauigkeiten von besser als $1 \mu\text{m}$ möglich sind und Justiervorgänge entfallen.

Um eine geeignete Plattform für die Fertigung von Hybridoptiken zu schaffen, wurde eine ›MMC 900H-Maschine von LT Ultra modifiziert. Verschiedene Funktionen wurden ergänzt und bestehende Systeme für den Anwendungsfall optimiert (**Bild 4**).

Lufttemperierung von UP-Maschinen

Je nach Fertigungsverfahren, Werkstückgröße und Strukturdimensionen dauert die Fertigung von Hybridoptiken von nur einer Stunde bis zu einer Woche. Hierbei sind konstante Umgebungsbedingungen entscheidend, um ungewollte Deformationen des Werkstücks auszuschließen, die ansonsten zum Beispiel die Wellenfront verzerren. Das Maschinenkonzept wurde dazu zusätzlich um eine Lufttemperierung ergänzt. Hierbei handelt es sich um ein Beistellgerät, welches mittlerweile auch in andere Anlagen von LT Ultra integriert ist. Die Luft im Prozessraum wird mit einer geringen Frischluftbeimengung

RENISHAW
apply innovation™



Einfache
Installation



Hohe
Geschwindigkeiten



Optionales
ADT (Advanced
Diagnostic
Tool)

QUANTIC™ Digitales Inkrementelles Wegmesssystem



EMO
Hannover: Halle 6, Stand D48

Entwickelt für die Fertigung

Die neue QUANTIC Baureihe verbindet Renishaws bewährtes Filteroptikkonzept und Interpolationstechnologie: Schnell, superkompakt, einfach installierbar und voll digital.

Für mehr Informationen besuchen Sie
www.renishaw.de/quantic



Bild 6. Interferometrische Rundlaufmessung von LT Ultra-Precision Technology

umgewälzt und mittels Präzisionskühlern temperiert. Dieses Vorgehen ist erheblich einfacher, als beispielsweise den gesamten Maschinenaufstellraum hochgenau zu klimatisieren.

Die Luftumwälzung (Umluft) erlaubt ein effizientes Regeln der Temperatur, da nur die eingebrachte Wärmeleistung aus Prozess und Kabine (Umgebungstemperatur) kompensiert werden muss. Versuche bei UP-Fräsmaschinen zeigen ein Einsparpotenzial von mindestens 25 Prozent.

Das Beistellgerät erfüllt außerdem die Atex-Richtlinie, um auch ein sicheres Arbeiten mit gegebenenfalls entzündlichen oder explosiven Kühlschmierstoffen zu ermöglichen. Für einen Einsatz im Reinbeziehungsweise Grauraum können verschiedene Luftfilterstufen verwendet werden. Mit diesem System konnte über einen Zeitraum von über einer Woche eine Temperaturkonstanz von ± 20 mK realisiert werden. Es stellt somit eine Kühllösung selbst für anspruchsvollste Prozesse dar.

UP-Kipp-Schwenkeinheit

Um die hohen geforderten Fertigungsgenauigkeiten zu erreichen, wurde eine neue UP-Kipp-Schwenkeinheit entwickelt und umgesetzt (**Bild 5**). Die Kipp-Schwenkeinheit ist mit Torque-Motoren im Direktantrieb ohne weitere Umsetzer ausgestattet. In Kombination mit der hydrostatischen Lagerung und mit Glasmaßstäben ergibt sich eine ansonsten unerreichte Positioniergenauigkeit bei einer umkehrfreien Positionierung. Die geforderten Zielsetzungen des Forschungskonsortiums von Steifigkeiten mit mehr als $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ sowie von Rund- und Planlaufgenauigkeiten von besser als 50 nm wurden hierbei mit $500 \text{ N}/\mu\text{m}$ und 40 nm überboten. Der Vakuumchuck mit 120 mm Spanndurchmesser und der Schwenkbereich von $\pm 95^\circ$ gewährleisten volle Flexibilität.

Höchstgenaue Rund- und Planlaufmessung

Um die Qualität auch verifizieren zu können, wurde ein Messstand entwickelt, um Rund- und Planlauf

der rotativen Achsen zu bestimmen (**Bild 6**). Hierfür dient interferometrische Messtechnik sowie ein von LT Ultra und der TU Berlin entwickelter Auswertalgorithmus zur Erfassung, Verarbeitung und Darstellung der Achsfehler. Mit den vier verwendeten Sensoren in einer Ebene werden somit die Ausrichtfehler und Formfehler des Messnormals kompensiert, und der Algorithmus liefert »nur« den Achsfehler. Dies ist entscheidend, denn selbst die besten Messnormale weisen einen Formfehler von 20 bis 50 nm auf. Derzeit wird das System weiterentwickelt, um es in mehreren Ebenen und bei verschiedenen Produktfamilien von LT Ultra, zum Beispiel auch bei hochdrehenden Spindeln, einsetzen zu können.

Die Inline-Messtechnik

Um die Qualitätssicherung zu verbessern und die Rüstzeiten zu verringern, wurde die Anlage mit einer zusätzlichen Messachse ausgestattet. An dieser Achse befinden sich unter anderem ein Atomkraftmikroskop (AFM), ein taktils Messsystem und optional auch eine hochauflösende Mikroskopkamera. Somit lassen sich Werkstücke mit höchster Genauigkeit rüsten und vorvermessen.

Mit dem AFM ist nach Fertigung weniger Strukturen die erste Inline-Qualitätsabschätzung möglich (**Bild 7**). Ein Entnehmen der Hybridoptik, um die Struktur extern zu vermessen, und ein erneutes Einbringen mit der notwendigen Genauigkeit ist nicht möglich. Somit lassen sich frühzeitig mögliche Fehler erkennen, die ansonsten erst nach der zeitintensiven Fertigung sichtbar werden.

Das Konsortium

Gemeinsam mit Carl Zeiss Jena, LT Ultra-Precision Technology und der Technischen Universität Berlin wurde im Rahmen des Forschungsprojekts »3D Blaze« (KMU-innovativ: Photonik, gefördert durch das BMBF) eine Maschinen- und Prozesstechnologie zur mechanischen Fertigung von Hybridoptiken entwickelt. Die erarbeiteten Technologien stehen dabei nicht in Konkurrenz zu bestehenden litho-

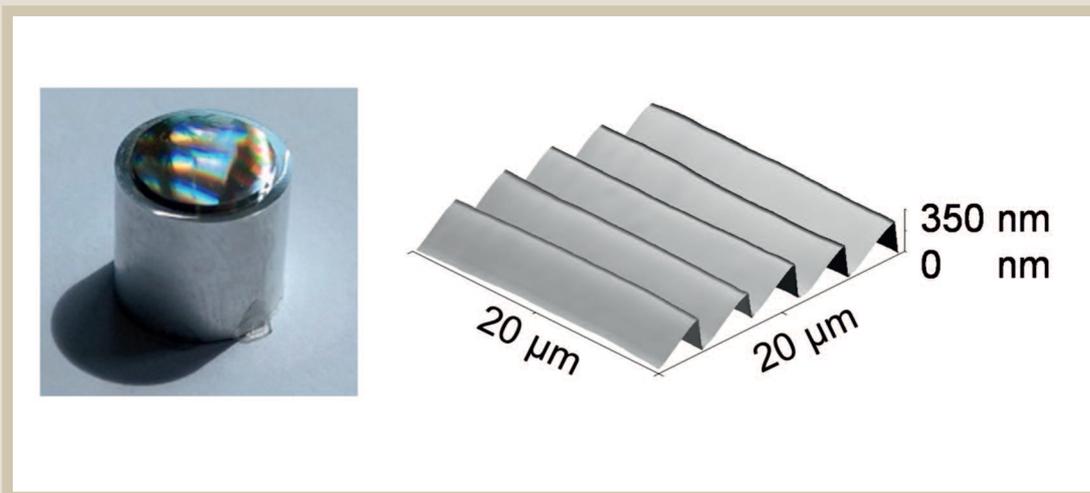


Bild 7. Konvex gekrümmtes Beugungsgitter in RSA-Aluminium und Topografie der Gitterstrukturen

grafischen Fertigungstechnologien, sondern bilden eine komplementäre Ergänzung des anwendungsspezifischen Fertigungsportfolios der Beugungsgitterindustrie. ■ MI110617

AUTOREN

Dr. KURT HASKIC ist im Bereich F&E bei LT Ultra-Precision Technology in Herdswangen-Schönacht tätig; kurt.haskic@lt-ultra.com
 Prof. Dr.-Ing. DIRK OBERSCHMIDT ist Leiter des Fachgebiets Mikro- und Feingeräte an der Technischen Universität Berlin; oberschmidt@mfg.tu-berlin.de

Der neue Maßstab in der Fertigungs- messtechnik. Von Alicona. Das ist Messtechnik!

*µCMM ist das erste rein optische 3D Koordinatenmesssystem.
 Sie messen mit nur einem Sensor Maß, Lage, Form und Rauheit
 von komplexen Bauteilen mit kleinsten Toleranzen.
 Längenmessabweichung $E=(0,8+L/600) \mu\text{m}$.*

