

# Formnestfertigung in UP-Qualität

Die effiziente Herstellung von Formwerkzeugen für die Replikation ultrapräziser und mikrostrukturierter Bauteile gelingt nur, wenn die gesamte **PROZESSKETTE** beherrscht wird – von der Datenaufbereitung bis zur hochgenauen Inprozess-Messtechnik.

## KAI SCHMIDT UND KURT HASKIC

**M**oderne Kunststoffe und eine geeignete Prozessführung erlauben es, ultrapräzise Formteile replikativ zu fertigen. Benötigt werden sie beispielsweise im Automotive-Bereich, in der optischen Industrie oder in der Medizin- und Messtechnik. Je nach Anwendungsgebiet stehen unterschiedliche Anforderungen im Vordergrund: hohe Formgenauigkeit und Oberflächengüte bei Kameralinsen, großflächig aufgebrachte Mikrostrukturen für Displayanwendungen, feinste und hochgenaue Strukturen für die Mikrofluidik, nanometrische Gitterstrukturen für Analysensysteme und oft auch Kombinationen davon (**Bild 1**).

Die für die Abformung benötigten Formwerkzeuge sind komplex und müssen höchsten Anforderungen genügen. Eines der wichtigsten Verfahren zur Herstellung ultrapräziser Formen ist die Ultrapräzisionsbearbeitung mit bestimmter Schneide, die

### > KONTAKT

HERSTELLER  
**LT Ultra-Precision Technology GmbH**  
88634 Herdwangen-Schönach  
Tel. +49 7552 40599-0  
Fax +49 7552 40599-50  
[www.lt-ultra.de](http://www.lt-ultra.de)



Bild 1. Ultrapräzise Abformwerkzeuge

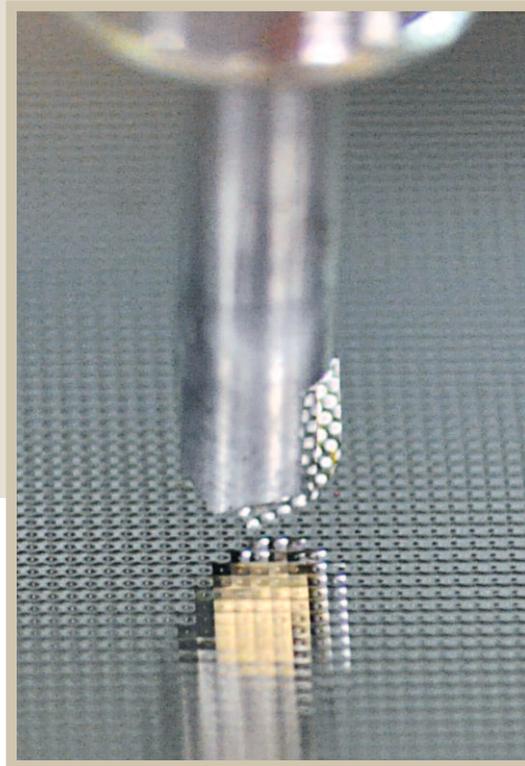
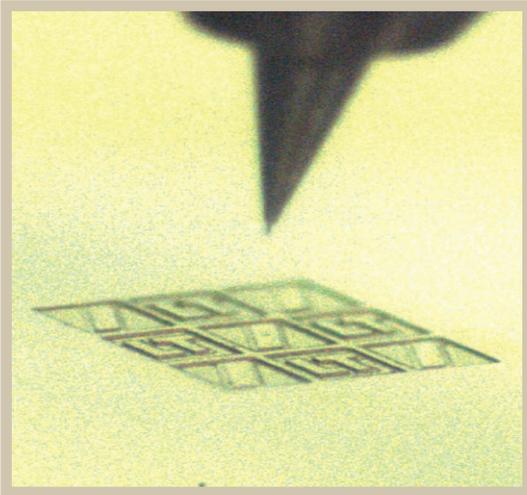


Bild 2. Links: Mikrofluidikstruktur; rechts: Linsenarray

meist aus monokristallinem natürlichen oder künstlichen Diamant besteht. Mit ihr lassen sich optische Oberflächen oder Mikrostrukturen erzeugen, wobei die Gratbildung gering ist. Eine ausreichende Oberflächenqualität ist ohne Nachpolieren möglich. Gegenüber klassischen Verfahren kann einerseits ein Prozessschritt entfallen, andererseits beeinträchtigt die Politur die Formgenauigkeit nicht. Außerdem können Kunststoffe direkt bearbeitet werden, was die Prozesskette für die Herstellung von Mustern und Prototypen verkürzt.

### UP-Fräsen mit Diamantwerkzeugen

Der Schneidstoff beim Fräsen ist Diamant. Es werden nur Werkstoffe ohne Kohlenstoffaffinität eingesetzt, weil diese für einen sehr schnellen Verschleiß der Werkzeuge sorgen würde. Ein beliebter Werkstoff ist Nickelphosphor. Wenn Ultrapräzisionsmaschinen verwendet werden, ist mit Schneidstoffen wie CBN oder Ultrafeinstkornhartmetall eine optische Oberflächenqualität in Stahl ohne Nachpolieren möglich. Dadurch reduzieren sich die damit verbundenen Genauigkeitsabweichungen auf ein Minimum. Oftmals wird dies beim Spritzgießen von Formen für die Replikation von Analyse-Chips angewendet. Hierbei lassen sich auf kleinstem Raum optische und fluidische Komponenten kombinieren (Bild 2).

### Möglichkeiten des UP-Drehens

Durch die ultraschallgestützte Oszillation des Diamantwerkzeugs gibt es beim Drehen mit Ultrapräzisionsmaschinen keine Einschränkung bei den bearbeitbaren Werkstoffen. Hierbei sind in sogenannten Kunststoffformenstählen vergleichbare Rauheitswerte wie in Buntmetallen oder Nickelphosphor realisierbar.

Entgegen der gängigen Meinung können neben rein rotationssymmetrischen Optiken oder Strukturen mit dem dynamischen Achsmodus auch Freiformflächen oder Linsenarrays gefertigt werden. Bei Strukturen mit hoher Ortsfrequenz bietet sich hierbei

ein FTA (Fast Tool Axis) an, um die Fertigungszeiten zu verkürzen. Mit der piezobetriebenen Achse des »FTA 100« wird ein Stellweg von bis zu maximal 100 µm umgesetzt (Bild 3). Je nach Hub wird mit einer Frequenz des Piezoaktors von bis zu 300 Hz gefertigt. Abhängig von der herzustellenden Struktur und dem Werkstoff betragen die Rauheitswerte  $R_a$  3 bis 5 nm, und die Formabweichung liegt im Sub-µm-Bereich.

### Ultrapräzisionsfertigen auf Sondermaschinen

Um langlebige Formen oder Master zu erzeugen, eignen sich auch Walzendrehmaschinen. Sie bringen beispielsweise an Zylindern mit einer Länge von mehreren Metern optische Mikrostrukturen auf. Die Walzen werden für die »Roll-to-Foil«-Replikation verwendet, um großflächige Folien beispielsweise für Displayanwendungen schnell und kosteneffektiv herzustellen (Bild 4).

Neben diesen sehr großflächigen Werkstücken stellen Hybridoptiken den anderen Extremfall dar. Diese höchstgenauen Master, die refraktive (klassische Strahlenoptik) und diffraktive (Beugung) Elemente aufweisen, messen oft nur wenige Millimeter oder Zentimeter im Durchmesser. Typisch ist hierbei eine sphärische Grundform, die mit einer diffraktiven Mikro- oder Nanostruktur überlagert wird (Bild 5). Die Fusion beider Funktionen in einem einzigen Bauteil erhöht zum einen den Wirkungsgrad und reduziert zum anderen die Anzahl der optischen Komponenten. Auch erleichtert sie das Justieren des gesamten optischen Systems. Die Herstellung erfolgt, indem auf einer Maschine verschiedene Fertigungsverfahren

**Bild 3. Links:** gedrehte Freiformfläche (Wabenstruktur); **rechts:** FTA 100 (Fast Tool Axis) zur ultraschallunterstützten Bearbeitung mit Diamant

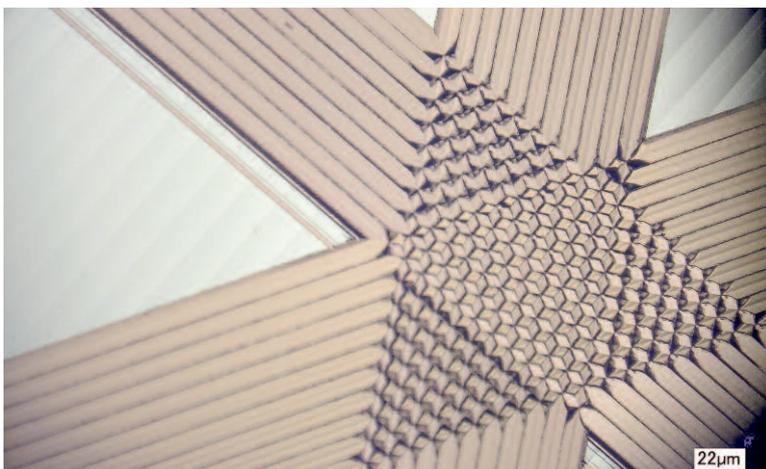
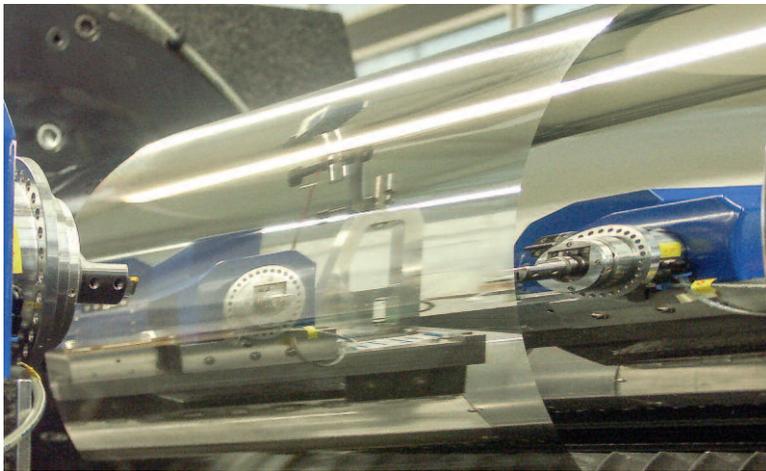


wie das Fräsen oder Drehen mit dem Hobeln oder Furchen kombiniert werden. Typische Anwendungsfelder hierfür sind hochauflösende Messsysteme wie Spektrometer, die aufgrund dieser Vorteile zum Beispiel in der Raumfahrt zum Einsatz kommen.

**Bild 4. Oben:** eine Walzendrehmaschine; **unten:** eine Mikrostruktur auf einer Walze

### Von der Datenaufbereitung bis zur Messtechnik

Bei einer kompletten Fertigungskette für die Formnestfertigung in UP-Qualität wird das NC-Programm für die Bearbeitung angepasst. CAD/CAM-Lösungen,



die sich schon in der 5-Achs-Programmierung von Fräsmaschinen oder Bearbeitungszentren bewährt haben, eignen sich jedoch nicht für die Ultrapräzisionsbearbeitung von komplexen Geometrien. Hierbei sind die resultierenden Sehnenfehler zu groß und führen zu Formabweichungen. Diese Sehnenfehler entstehen bei der Bahnplanung der CAM-Software. Sie markieren den Fehler, der für das Endprodukt hinnehmbar ist, und den Zeitpunkt, ab dem die Verfeinerung der Berechnung abgebrochen wird. Gängige CAD/CAM-Lösungen kommen selten unter einen Sehnenfehler von 5 oder 10 µm. In der Ultrapräzisionstechnik ist aber oft ein Sehnenfehler im Nanometerbereich gewünscht.

Eine weitere Schwachstelle ist der Punkteabstand, der bei einer Ultrapräzisionsbearbeitung sehr viel geringer sein muss als bei einer konventionellen Bearbeitung. Diese stark erhöhte Datenmenge verlängert die Berechnungszeiten proportional oder macht diese unter Umständen komplett unmöglich. Daher sind Bahnplanungsalgorithmen gefragt, die bei gleichbleibender Rechenzeit eine wesentlich höhere Punktedichte erzeugen.

Um ein Endprodukt in UP-Qualität herstellen zu können, benötigt das CAD-Modell eine entsprechende Auflösung, die besser als die zu erreichende Bauteilgenauigkeit sein muss. Hierbei ist bei den Austauschformaten STP/IGES darauf zu achten, die Auflösung entsprechend hoch einzustellen. Die besten Ergebnisse werden erreicht, wenn sich die Form analytisch wiedergeben lässt und das CAM-System die direkte Eingabe von Oberflächen als Gleichungen unterstützt.

Wichtig ist auch das Vermessen der verwendeten Werkzeuge, da sich hier entstehende Fehler direkt in dem Endergebnis widerspiegeln. Daher müssen die Länge, der Durchmesser und eventuell der Radius präzise vermessen werden, um eine geringe Formabweichung zu erreichen.

Die Ultrapräzisionsfräsmaschine »MMC 600H« von LT Ultra vermisst beispielsweise Fräswerkzeuge mit einer Lasermessbrücke (**Bild 6**). Die Messroutinen



**Bild 5. Fertigung einer Hybridoptik in Nickelphosphor**

wurden angepasst und erlauben eine Vermessung mit einer Wiederholgenauigkeit im Nanometerbereich. Die Ultrapräzisionsdrehmaschinen verfügen über eine hochauflösende Mikroskopkamera, um die exakte Schneidenposition und den exakten Radius berührungslos zu erfassen.

### Erfassen und Kompensieren von Abweichungen

Trotz sorgfältiger Vorbereitung, Programmerstellung und Werkzeugvermessung kann es im Ergebnis manchmal zu einer Formabweichung kommen, beispielsweise durch Formfehler des Werkzeugs. Dies ist zum einen der Fall, wenn die einzelnen Strukturen sehr filigran ausgelegt sind und über eine geringe Steifigkeit verfügen, oder zum anderen, wenn die Prozessbedingungen durch äußere Einflüsse zu stark schwanken. Hierbei ist es sinnvoll, die Werkstücke direkt in der Maschine zu vermessen und mit diesen Werten das CAM-Programm zum Beispiel durch ein verändertes Aufmaß oder durch eine überlagerte Sollkontur anzupassen. In der Praxis hat sich die Vermessung der Werkstücke mit verschiedenen taktilen oder optischen Messmitteln bewährt, deren Genauigkeit je nach Ausführung in der Qualität von Mess-

maschinen liegt. Typische Messmittel sind beispielsweise taktile schaltende 3D-Taster, messende Taster oder berührungslos arbeitende, optische Messtaster.

Für die Fertigung ultrapräziser Formwerkzeuge stellt das Unternehmen LT Ultra-Precision Technology die notwendigen Maschinen, Peripheriegeräte und Softwarekomponenten aus einer Hand bereit. Die

Lohnfertigung auf Ultrapräzisionsmaschinen gehört ebenfalls zum Leistungsspektrum – vom Einzelwerkstück bis hin zu Serienteilen. ■ MI110515

### AUTOREN

Dr. KAI SCHMIDT ist im Bereich F&E beim Unternehmen LT Ultra-Precision Technology in Herdswangen-Schönach tätig;

kai.schmidt@lt-ultra.com

Dr. KURT HASKIC ist ebenfalls im Bereich F&E

bei LT Ultra-Precision Technology tätig;

kurt.haskic@lt-ultra.com

**Bild 6. Eine 5-Achs-Simultan-Ultrapräzisionsfräsmaschine »MMC 600H« von LT Ultra**

