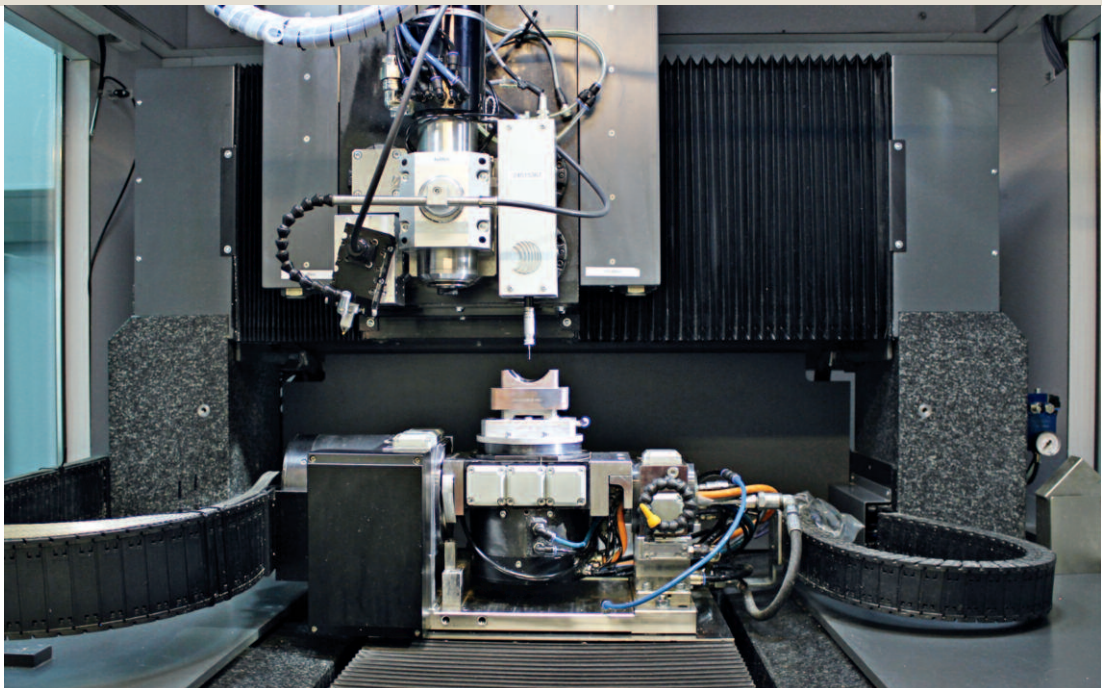


# Bearbeitung optischer Bauteile aus Stahl

Die Fertigung komplexer optischer Flächen in **GEHÄRTETEM** Stahl auf einer 3- bis 5-Achs-Maschine erschließt neue Möglichkeiten in der Optik-Herstellung. Moderne Maschinen erzielen dabei eine hohe Produktivität und erweitern das Produktportfolio in der Fertigung hochkomplexer Bauteile.

**Bild 1. Innenraum der Kugler »Micro-master« mit einer montierten Frässpindel mit HSK25-Aufnahme (Mitte), einem ausfahrbaren Messtaster (2D-Antastunsicherheit  $\pm 1 \mu\text{m}$ ) und dem angestellten ultraschallunterstützten Diamantwerkzeug (links). Das Werkstück befindet sich auf der Dreh-Schwenk-Einheit in der Bildmitte**



## ROLAND BOHR

**K**unststoff-Optiken finden sich heute in vielen verschiedenen Anwendungen. Diese reichen von optischen Elementen für LED-Taschenlampen bis hin zu Linsen für Kfz-Beleuchtungen, welche im Mehrlagenspritzguss hergestellt werden. Den meisten dieser Optiken ist gemein, dass sie eine Spritzgussform oder einen entsprechenden Formeinsatz benötigen. Ein entscheidendes Kriterium hierbei ist die Lebensdauer der Form respektive des Formeinsatzes.

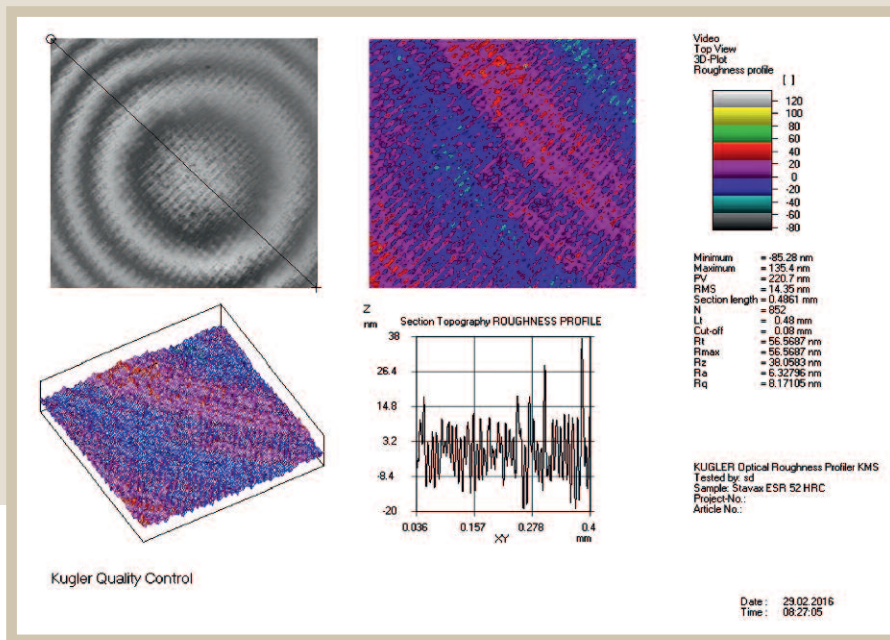
Zur Fertigung der optischen Formen für den Spritzguss dienen verschiedene Verfahren. Gehärtete Stahlformen werden bisher zuerst gefräst oder erodiert und anschließend bis zur optischen Qualität poliert. Die Politur wird häufig von Experten von Hand durchgeführt, allerdings leidet beim Polierprozess die Form des Einsatzes. Eine maschinelle Politur verringert die Formabweichungen durch den Polierprozess, kann sie aber nicht komplett vermeiden.

Insbesondere, wenn der eigentlichen Bauteilform noch eine besondere Oberflächenform (zum Beispiel eine Mikrostruktur) überlagert ist, kann durch das Polieren die Formabweichung erhebliche Ausmaße annehmen.

Die direkte optische Bearbeitung der Form oder des Formeinsatzes findet entweder in Messing, in Neusilber, in hochfesten Aluminiumlegierungen oder in chemisch vernickelten Stahlformen statt. Dabei wird die optische Form mittels Diamantbearbeitung direkt in den Einsatz oder die Spritzgussform

## > KONTAKT

HERSTELLER  
**Kugler GmbH**  
 88682 Salem  
 Tel. +49 7553 9200-0  
 Fax +49 7553 9200-45  
[www.kugler-precision.com](http://www.kugler-precision.com)  
 Messe Optatec, Frankfurt: Halle 3.0, Stand H10



**Bild 2. Rauheitsmessung mit einem phasenschiebenden Mikroskop-Interferometer: Das Messfeld beträgt 340 µm × 340 µm, wodurch in der Diagonale eine Messlänge von 480 µm (entsprechend der Norm) gegeben ist**

eingebraucht. Die Standzeit des Spritzgusswerkzeugs ist naturgemäß geringer als bei vergleichbaren Werkzeugen in Stahl. Bei der Verwendung von heterogenen Spritzgussformen ergeben sich außerdem thermische Probleme aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und Wärmeleitwerte der Materialien.

Es wäre daher von Vorteil, gehärtete Stahlformen direkt diamantbearbeiten zu können. Leider ist die direkte Bearbeitung eisenhaltiger Legierungen mit Diamantwerkzeugen nicht möglich. Beim Drehen entstehen an der Schneide Temperaturen zwischen 500 und 700 °C. Bei diesen Temperaturen reagiert der Kohlenstoff des Schneiddiamanten mit dem Eisen des Stahls und bildet dabei Eisencarbide. Die Standzeit der Diamantwerkzeuge verkürzt sich dadurch erheblich.

Um dieser Standzeitproblematik zu begegnen, wurden bisher verschiedene Ansätze verfolgt. Der im Moment wohl beste Ansatz besteht darin, das Diamantwerkzeug auf einer elliptischen Bahn mit einer Frequenz von mehreren zehn Kilohertz schwingen zu lassen. Dadurch wird die Kontaktzeit zwischen dem Diamantwerkzeug und dem Werkstück extrem kurz gehalten, und somit bleibt die Temperatur im Schneidebereich so niedrig, dass der Werkzeugverschleiß sehr gering bleibt.

**Qualität auf allen Ebenen**

Diese Bearbeitungsmethode wurde bisher vor allem beim Diamantdrehen auf Ultrapräzisionsdrehmaschinen verwendet. Das Unternehmen Kugler aus Salem hat dieses Verfahren nun auf seiner hydrostatisch gelagerten 5-Achs-Mikrobearbeitungsmaschine »Micromaster« implementiert. Auf diese Weise können Bauteile realisiert werden, die durch einen Drehprozess nicht herstellbar sind. Speziell im Formenbau besteht mit dieser Maschine die Möglichkeit, effizient die Form des Spritzgusswerkzeugs vorzuarbeiten und dann auf derselben Maschine eine Oberfläche in optischer Qualität herzustellen. Durch den Aufbau der Micromaster können mehrere Systeme, zum Beispiel Bearbeitungsspindeln, Laserköpfe oder Ultraschall-Diamantwerkzeuge, nacheinander verwendet werden. Dadurch erhöht sich die Präzision enorm, besonders in Bezug auf die Lagetoleranzen, die in Spritzgussformen mit Formeinsätzen eine wichtige Rolle spielen (Bild 1).

OPTIMIERTE  
LIEFERZEITEN FÜR  
LOCHSTEMPEL UND  
BUCHSEN

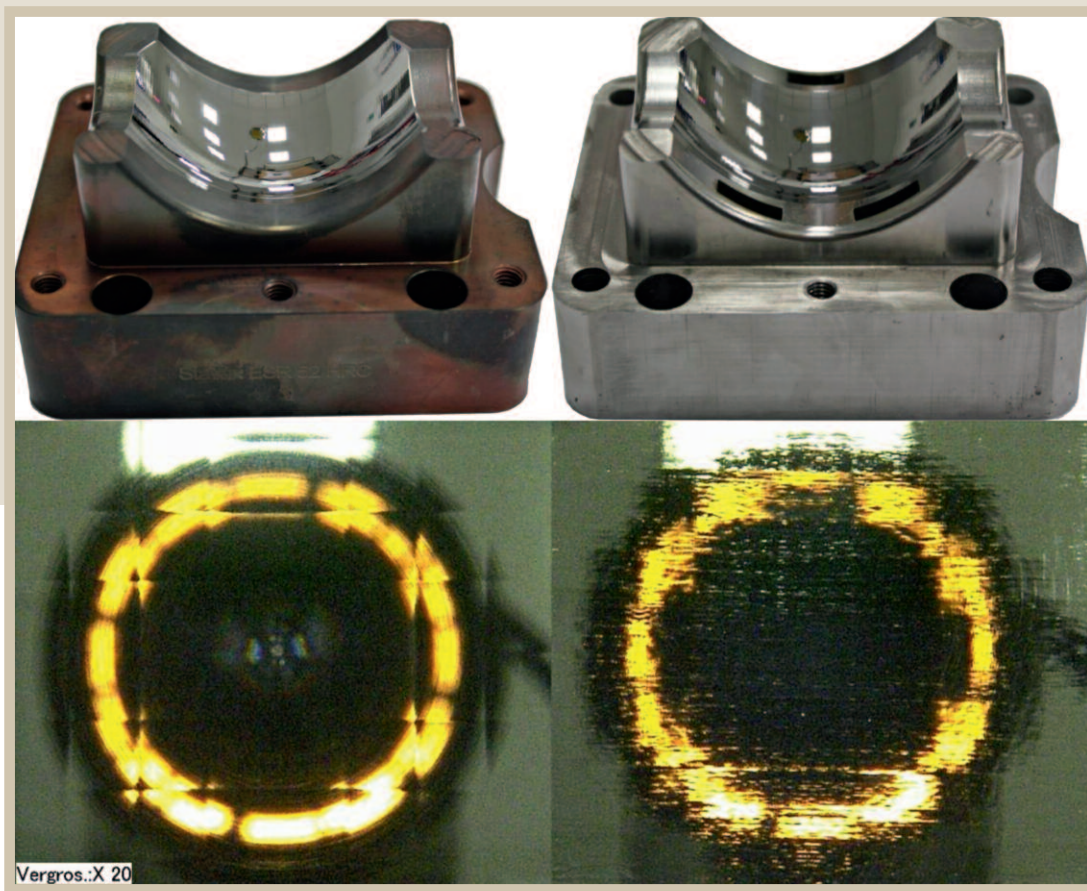


**Stanztec**  
Besuchen Sie uns:  
21. bis 23. Juni 2016  
in Pforzheim  
Halle MS-OG  
Stand-Nr. C-11

Fordern  
Sie uns!

- Kurze Lieferzeit
- Ab Lager verfügbar
- Höchste Präzision
- Beste Oberflächengüte
- Standard- & Sondergeometrien





**Bild 3. Vergleich des bei Kugler auf der Micromaster diamantbearbeiteten Bauteils (links) mit dem vom Kunden beigestellten Vergleichsteil (rechts). Der Farbunterschied der beiden Werkstücke rührt vornehmlich von der geringfügig unterschiedlichen Wärmebehandlung der Teile her**

### Alternativen in der Bearbeitung

Diese Möglichkeit der kombinierten Bearbeitung im Zusammenspiel mit der in die Maschine integrierten Messtechnik erlaubt die effiziente Herstellung von Spritzgussformen oder Formeinsätzen in optischer Qualität. Durch die Maschinengeometrie der Micromaster kann der Bearbeitungsprozess entweder als Quasi-Drehprozess oder als 5-Achs-Stoßprozess durchgeführt werden.

Die Diamantbearbeitung zur Herstellung optischer Flächen erzeugt eine regelmäßige Struktur auf der Werkstückoberfläche, da es sich um einen Bearbeitungsprozess mit definierter Schneide und definierter Werkzeugbahn handelt. Bei der ultraschallunterstützten Diamantbearbeitung gehärteten Stahls wird zusätzlich zu dieser Struktur eine weitere Struktur durch die Schwingbewegung der Werkzeugspitze erzeugt. Diese überlagerten Bewegungen lassen sich in Mikro-Rauheitsmessungen als regelmäßige Strukturen auf der Bauteiloberfläche nachweisen. Eine solche Rauheitsmessung zeigt für ein Werkstück aus Stavax ESR mit einer Härte von 52 HRC eine Rauheit von  $R_a = 6,3 \text{ nm}$ , wobei die größte Einzelrautiefe  $R_{\text{max}} = 56,6 \text{ nm}$  beträgt. Die regelmäßige Struktur durch die Ultraschall-Diamantbearbeitung kann in einigen optischen Anwendungen (speziell mit kohärentem, monochromatischem Licht) zu unerwünschtem Streulicht führen. Durch die bereits extrem geringe Rautiefe muss nur noch in geringem

Umfang poliert werden, um die Bearbeitungsstruktur der Oberfläche zu »verwischen«. Hierbei treten so gut wie keine Änderungen der Oberflächenform auf (**Bild 2**).

Die gezeigte Rauheitsmessung stammt von einem Formeinsatz für eine Linse mit einer kissenförmigen Mikrostruktur. Die Strukturhöhe der Kissenstruktur liegt hierbei im Bereich weniger Mikrometer. Das Bauteil wurde in einem »Drehprozess« auf der Kugler Micromaster gefertigt. Dabei wurde die C-Achse der Maschine als Drehachse verwendet. Die Mitteneinstellung des Werkzeugs und die nötigen Ausrichtungen des Bauteils wurden mit der Y- und der A-Achse realisiert. Das Profil wurde aus den X- und Z-Achsen heraus im Stile einer typischen Slow-Tool-Bearbeitung gefahren. Die erreichte Oberflächenqualität lässt sich sehr gut in einem direkten Vergleich mit einem vom Kunden beigestellten Bauteil beurteilen. Das vom Kunden beigestellte Teil hat die gleiche Form und Mikrostruktur, wurde jedoch auf einer konventionellen Maschine vorbearbeitet und anschließend poliert. Die Oberfläche des Teils zeigt, dass es vermutlich »überpoliert« wurde. Auf dem polierten Bauteil wurde eine Rauheit von  $R_a = 6,9 \text{ nm}$  erreicht. Der visuelle Eindruck des Kundenteils (mit bloßem Auge) ist gut (**Bild 3**).

Der Vergleich der beiden mikroskopischen Aufnahmen zeigt bei beiden Bauteilen die Kissenstruktur. Allerdings ist diese beim diamantbearbeiteten Teil direkt und klar zu erkennen, während beim

polierten Werkstück die Kissenstruktur nur dadurch sichtbar wird, dass die tatsächlich ringförmige Beleuchtung entsprechend der Oberflächenmodulation schachbrettartig erscheint. Die Politur auf dem Kundenteil ist vermutlich in linearer Weise durchgeführt worden, wodurch klare Oberflächenfeatures verwischt und eine zusätzliche Welligkeit auf das Bauteil aufgebracht wurden. Das diamantbearbeitete Bauteil zeigt neben der kissenförmigen Oberflächenstruktur lediglich noch leichte konzentrische Ringe durch den Bearbeitungsprozess.

### Sehr hohe Formgenauigkeit

Je nach Bauteilgeometrie lassen sich unterschiedlichste Bearbeitungsstrategien umsetzen. So erlaubt die 5-Achs-Konfiguration der Kugler Micromaster die Erzeugung optischer Strukturen auf gekrümmten Flächen. Damit lassen sich zum Beispiel lineare optische Gitter oder Facettenoptiken auf nicht ebenen Flächen erzeugen. Da zum Teil sehr filigrane Diamantwerkzeuge eingesetzt werden müssen, um entsprechend kleine Innenradien erzeugen zu können, muss die Bearbeitungsstrategie hierauf abgestimmt werden. Es kann beispielsweise nötig sein, die optische Struktur in mehreren Bahnen herauszuarbeiten. Dabei ist eine besonders hohe Wiederholgenauigkeit der Maschinenachsen, wie sie die Kugler Micromaster bietet, von ausschlaggebender Bedeutung.

Sehr häufig finden sich in den Spezifikationen eines optischen Bauteils Formgenauigkeiten im Bereich von 1 µm oder weniger. Der Werkzeugablauf muss dabei deutlich besser als die geforderte Formgenauigkeit sein, da die Form nicht ausschließlich durch den Ablauf des Werkzeugs, sondern auch durch andere, schwieriger zu kontrollierende Faktoren beeinflusst wird (**Bild 4**). Dies betrifft beispielsweise Eigenspannungen im Material oder eine lokale Abkühlung durch die Minimalmengensprühung.

Eine weitere Anwendung ist die Erzeugung von Mikrolinsenarrays in Stahl. Auch hier bietet die Micromaster eine sehr flexible Bearbeitungslösung, weil diverse Werkzeuge in einer Aufspannung genutzt

Bild: Kugler



**PULSAR**  
generator

5° Micro EDM control

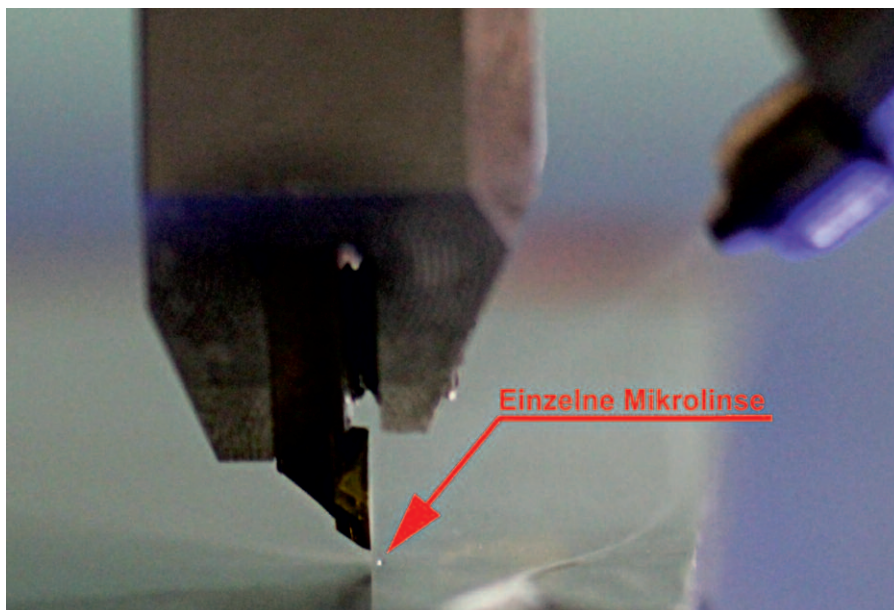
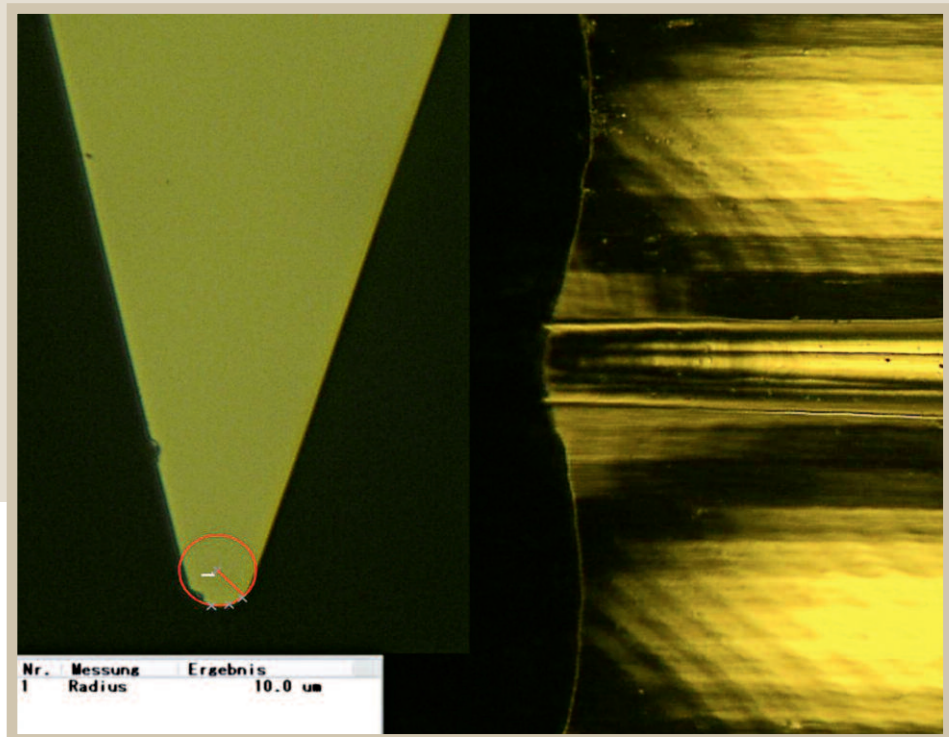
**SX100-hpm**  
High precision drilling  
3D Micro EDM Milling



**SARIX**  
3D MICRO EDM MACHINING  
sarix.com



**Bild 4. Mikrofacettenspiegel, hergestellt mit dem im Insert gezeigten Werkzeug. Der Spitzenradius des Diamantwerkzeugs beträgt  $10\ \mu\text{m}$ , da zwischen den einzelnen Facetten des optischen Elements höchstens ein Übergangsradius von  $15\ \mu\text{m}$  auftreten darf. Die Einzelfacetten wurden durch lineares Abzeilen erzeugt**



**Bild 5. Bearbeitung der ersten Mikrolinse eines Mikro-linsenarrays mit genauen Anforderungen an die Position des Mikro-linsenarrays bezüglich der äußeren Bauteilkanten**

werden können. Je nach Größe der Einzellinsen im Linsenarray kann die Struktur direkt mit dem Diamanten gefertigt werden. Es kann aber auch zunächst die Grobform der Linse erzeugt und dann mit dem Diamanten nachbearbeitet werden. Dabei wird auf einem ebenen Substrat eine der Linsenkontur entsprechende Bahn aus zwei Linearachsen herausgefahren. Ist der Linsenradius größer als der Radius des Werkzeugs, so wird durch schrittweises Verfahren der dritten Linearachse eine Bahn in optischer Qualität neben die andere gelegt. Der nötige Bahnabstand ergibt sich dabei lediglich aus dem Spitzenradius des Diamantwerkzeugs und der zulässigen Rauheit. Zu berücksichtigen ist hierbei noch, dass die tatsächlich erreichte Rauheit üblicherweise größer ist als die

durch den Bahnabstand und den Radius vorgegebene kinematische Rauheit. Daher sollte die für den Bahnabstand zugrunde gelegte zulässige Rauheit höchstens halb so groß gewählt werden wie die tatsächlich zulässige Rauheit. Auch hier gilt, dass die Rauheit normalerweise nicht ausschließlich durch die kinematische Rauheit (Werkzeugradius und Bahnabstand) gegeben ist. Sie wird in gleichem Maße durch andere Effekte beeinflusst, beispielsweise durch die Korngrößenverteilung im Material sowie die nichtisotropen Eigenschaften der Einzelkristalle des Werkstoffs.

Ein weiterer Vorteil der Herstellung optischer Flächen auf einer Mehrachs-Bearbeitungsmaschine liegt in der Möglichkeit, Bauteile ohne Rotationssymmetrien leicht einmessen zu können. Typische UP-Drehmaschinen verfügen zwar über Taster-

systeme zur Bestimmung des Radial- und Axial-schlags bei rotationssymmetrischen Bauteilen, normalerweise ist es aber nicht möglich, oder nur mit großen Genauigkeitseinbußen, Bauteile ohne entsprechende Symmetrien definiert einzumessen (**Bild 5**). ■ MI110427

#### AUTOR

Dipl.-Ing. ROLAND BOHR ist seit zehn Jahren bei der Kugler GmbH in Salem unter anderem als Ingenieur in den Bereichen Mikrofertigung, Clean-Assembly und Mikrosystemtechnik tätig; roland.bohr@kugler-precision.com