

# 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.

## Обработка оптических компонентов, изготовленных из стали

Изготовление комплекса оптических поверхностей из закалённых сталей на 3-5 осевом станке открывает новые возможности в производстве оптики. Современные станки достигают при этом высокой производительности и расширяют спектр своего применения в производстве сложных деталей.

Bild 1. Innenraum der Kugler «Micromaster» 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

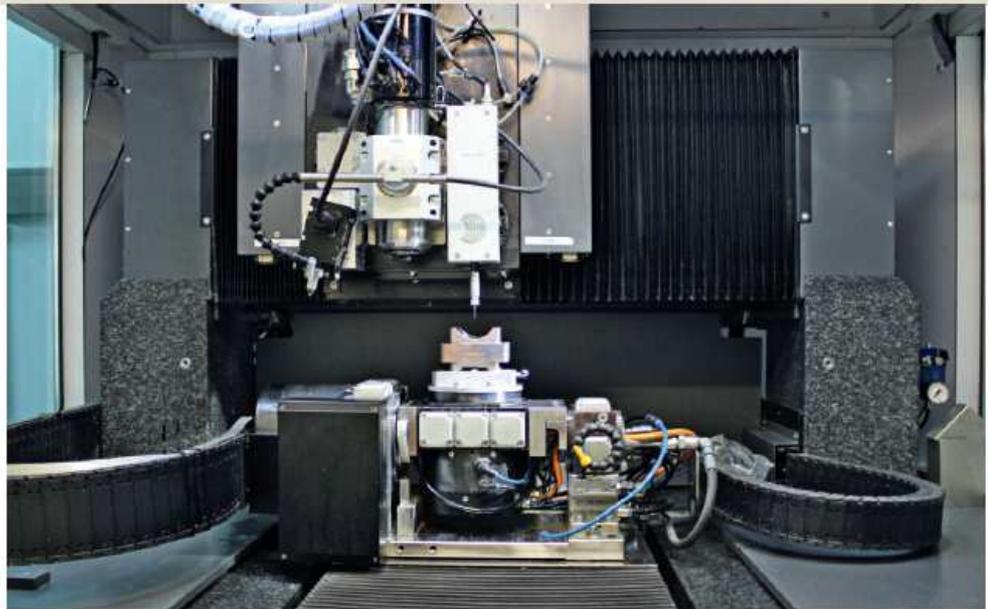


Рисунок 1. Внутреннее пространство станка Kugler «Micromaster» со смонтированным шпинделем с HSK25 — изображение (в центре), выдвижным датчиком (2D точность измерения  $\pm 1 \mu\text{m}$ ) и со вспомогательным ультразвуковым алмазным инструментом (слева). Обрабатываемая деталь расположена на токарно-поворотном блоке в середине рисунка.

## 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**

Bilder: Kugler

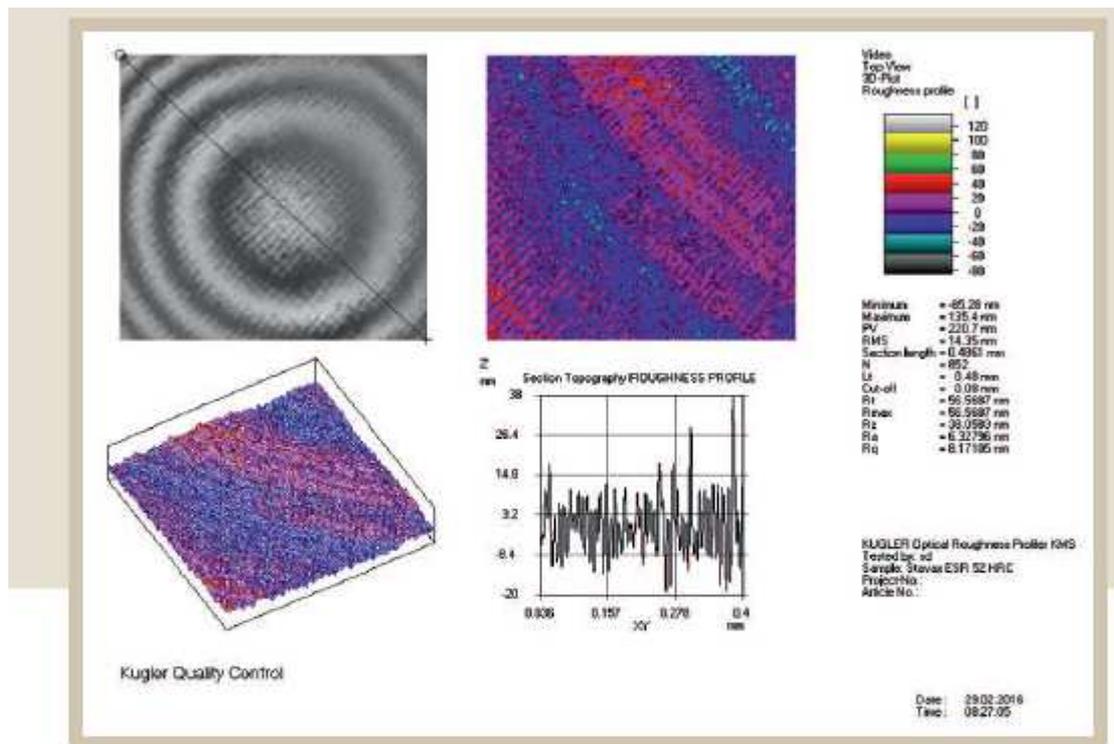
© MIKROvent, Mainburg

MIKROPRODUKTION 03/18

Пластмассовую оптику можно найти сегодня во многих областях применения. Начиная с оптических элементов для светодиодных настольных ламп до линз для автомобильного освещения, которые производятся с применением многослойного литья пластмасс под давлением. Большинство из этих линз широко распространены из-за того, что у них имеется пресс-форма для литья под давлением или соответствующая вставка пресс-формы. Ключевым моментом здесь является срок службы пресс-формы или вставки пресс-формы.

Для изготовления оптических пресс-форм для литья под давлением, используются различные методы. Закаленные стальные формы предварительно фрезеруются или обрабатываются эрозией и шлифуются с последующей полировкой до оптического качества. Полировка часто производится имеющимися специалистами вручную, но форма элемента нарушается в процессе полировки. Механическая полировка уменьшает отклонения в форме в процессе полировки, но ее невозможно избежать полностью. В частности, если фактический компонент (например, микроструктура), накладывается на особую форму поверхности, отклонение формы при полировке может быть значительным.

Прямая оптическая обработка осуществляется, когда пресс-формы или вставки пресс-формы изготавливаются из латуни, нейзильбера, высокопрочного алюминиевого сплава либо из химически никелированных стальных форм. При этом оптический элемент пресс-формы, обработанный алмазным инструментом, вставляется прямо во вставку или пресс-форму для литья.



**Bild 2. Rauheitsmessung mit einem phasenschleibenden Mikroskop-Interferometer:  
 Das Messfeld beträgt  $340\ \mu\text{m} \times 340\ \mu\text{m}$ , wodurch in der Diagonale eine Messlänge  
 von  $480\ \mu\text{m}$  (entsprechend der Norm) gegeben ist**

Рисунок 2. Шероховатость, измеренная на микроскопе-интерферометре с фазовым сдвигом: поле измерения составляет  $340\ \mu\text{м}$  на  $340\ \mu\text{м}$ , в результате чего на диагонали длина измерения  $480\ \mu\text{м}$  (в соответствии со стандартом)

eingbracht. 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  $700\ \text{°C}$ . 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.

Срок службы литейной формы, естественно, ниже, чем у сравнимых стальных инструментов. В случае использования неоднородных литейных форм, появляются температурные проблемы, связанные с различными коэффициентами расширения и теплопроводности материалов.

Следовательно, было бы выгодно иметь возможность алмазной обработки непосредственно закаленной стальной формы. К сожалению, прямая обработка железосодержащих сплавов алмазным инструментом невозможна. При точении на режущей кромке возникает температура между 500 и 700 °С. При таких температурах углерод алмазного резца реагирует с железом в стали и образует карбиды железа. Срок службы алмазного инструмента значительно сокращается.

Для решения этой проблемы до настоящего времени были предприняты различные подходы. На данный момент лучший подход заключается в том, чтобы позволить алмазному инструменту вибрировать на эллиптической орбите с частотой в несколько десятков кГц. Таким образом, время контакта между алмазным инструментом и обрабатываемой деталью чрезвычайно коротко, поэтому температура в зоне резания остается настолько низкой, что износ инструмента остается очень небольшим.

### 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).

MIKROPRODUKTION 03/16

### Качество на всех уровнях

Этот метод обработки использовали, главным образом, при алмазном точении на ультрапрецизионных токарных станках. Компания Kugler из Салема внедрила этот процесс на своём 5-осевом станке с гидростатическими опорами Micromaster для микрообработки. В этом случае, могут быть реализованы компоненты, которые нельзя изготавливать токарной обработкой. Этот станок даёт возможность эффективно обрабатывать формы для литья под давлением и затем изготовить на этом же станке поверхность оптического качества. Благодаря конструкции Micromaster последовательно используется несколько систем, например, обрабатывающие шпиндели, лазерные головки или ультразвуковые алмазные инструменты. Это чрезвычайно повышает точность, особенно по отношению к допускам расположения, которые играют важную роль в формах для литья под давлением (Рис.1).



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

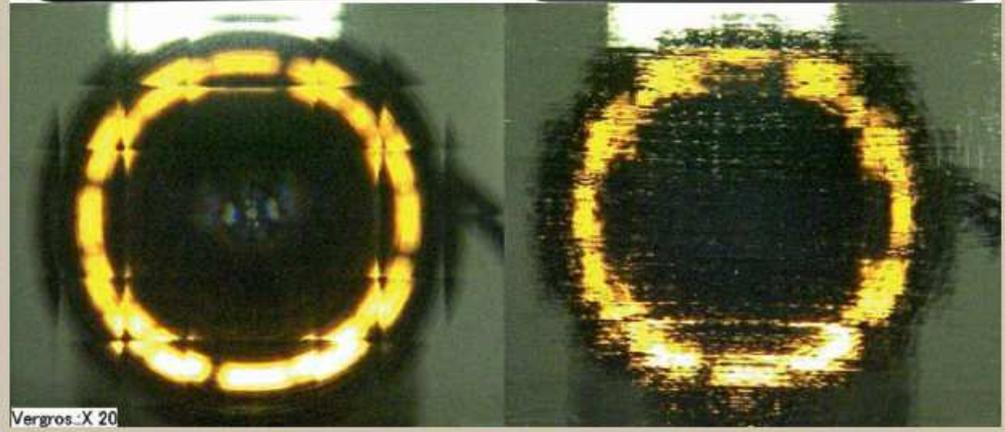


Рисунок 3. Сравнение компонента Kugler Micromaster, обработанного алмазным инструментом (слева), с сопоставимой деталью, присланной заказчиком (справа). Разность в цвете между двумя деталями в основном из-за несколько иной термической обработки деталей.

## 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

Bilder: Kugler

## Альтернативы в обработке

Эта возможность комбинированной обработки в сочетании с измерительными технологиями, встроенными в станок, позволяет эффективно изготавливать формы для литья или оптические вставки. Благодаря геометрии станка Micromaster, процесс обработки может быть выполнен либо как квази-токарный процесс, либо как 5-осевой ударный процесс.

Алмазная обработка при изготовлении оптических поверхностей создает регулярную структуру на поверхности детали, так как она представляет собой процесс обработки с определенной режущей кромкой и заданной траекторией перемещения инструмента. В случае ультразвуковой алмазной обработки закалённых сталей в дополнение к этой структуре генерируется последующая структура с помощью колебательного движения режущей кромки. Эти накладывающиеся движения могут быть обнаружены в измерениях микрошероховатости в качестве регулярных структур на поверхности компонента. Такое измерение шероховатости показано для детали, сделанной из материала Stavax ESR, имеющей твердость 52 HRC, шероховатость  $R_a=6,3 \text{ нм}$ , при этом самая большая одиночная шероховатость может иметь  $R_{\text{max}}=56,6 \text{ нм}$ . Регулярная структура ультразвуковой алмазной обработки может привести к нежелательному постороннему свету в оптических применениях (особенно с когерентным, монохроматическим светом). Благодаря уже чрезвычайно низкой шероховатости, требуется только небольшой объём полировки, чтобы «сгладить» структуру обработки поверхности. В этом случае, практически не появляется никаких изменений в форме поверхности (**Рис. 2**).

Указанные измерения шероховатости вставки пресс-формы для линзы с подушковидной микроструктурой. Структурная высота подушковидной структуры в этом случае находится в области менее микрометра. Деталь была изготовлена в процессе токарной обработки на станке Kugler Micromaster. Ось С на станке была использована как ось вращения. Центрирование инструмента и необходимые настройки детали были реализованы осями Y и A. Профиль был реализован осями X и Z в стиле типичной медленной инструментальной обработки. Достигнутое качество поверхности может быть хорошо оценено в прямом сравнении с деталью, предоставленной заказчиком. Часть, предоставленная заказчиком, имеет ту же форму и микроструктуру, но была предварительно обработана на станке с ручным управлением и впоследствии отполирована. Поверхность детали показывает, что она, возможно, была излишне отполирована. Шероховатость Ra=6.9 нм была достигнута на отполированной детали. Визуальное впечатление от детали заказчика (невооруженным глазом) хорошее (Рис. 3).

Сравнение двух микроскопических изображений показывает подушковидную структуру для обеих деталей.

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.

Тем не менее, это можно увидеть прямо и ясно на детали с алмазной обработкой, в то время как отполированная структура показывает подушковидную структуру только тем, что фактическая кольцеобразная подсветка появляется в шахматном порядке в соответствии с модуляцией поверхности. Полировка на детали потребителя, скорее всего, была выполнена линейным способом, в результате чего четкие особенности поверхности были размыты и на детали появилась дополнительная волнистость. В дополнение к подушковидной структуре поверхности, деталь с алмазной обработкой показывает только небольшие концентрические кольца из-за процесса обработки.

## 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

MIKROPRODUKTION 03/18

## Очень высокая точность формы

В зависимости от геометрии детали, могут быть внедрены разные стратегии обработки. 5-осевая конфигурация Kugler Micromaster позволяет создать оптические структуры на изогнутых поверхностях. Так, например, могут формироваться линейные оптические решетки или фасетная оптика на неплоских поверхностях. Так как в некоторых случаях нужно использовать очень тонкие алмазные инструменты, чтобы суметь изготовить небольшие внутренние радиусы, стратегия обработки должна быть адаптирована к этому. Это может быть необходимо, например, для обработки оптической структуры из нескольких путей. При этом решающее значение имеет особенно высокая повторяемость осей станка, какую обеспечивает Kugler Micromaster.

Очень часто в спецификациях оптической точности детали встречается точность формы в диапазоне от 1 мкм или менее. Инструментальная последовательность должна быть лучше, чем требуемая точность формы, так как на форму влияет не только действие инструмента, но также другие факторы, которые более сложно контролировать (**Рис. 4**). Это касается, например, остаточного напряжения в материале или локального охлаждения распылением минимального количества СОЖ.

Другим применением является производство микролинзовых массивов в стали. Micromaster предлагает очень гибкое решение обработки, так как различные инструменты могут быть использованы в одной установке.

Bild 4. Mikrofacetten Spiegel, 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 Abzählen erzeugt

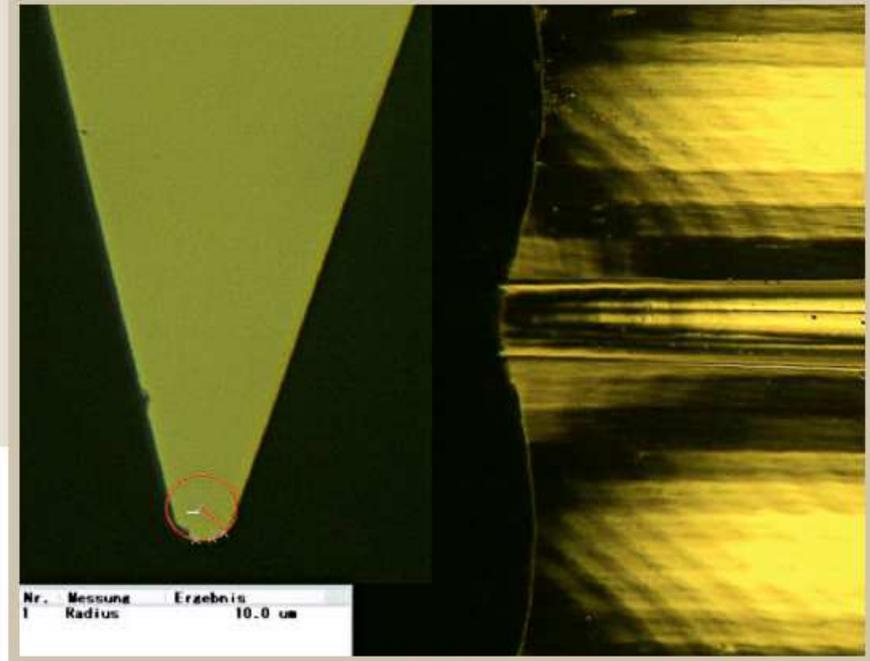
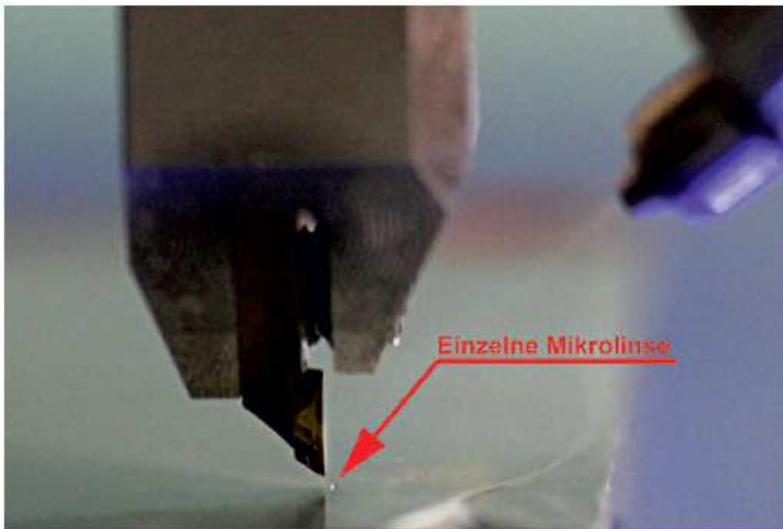


Рисунок 4. Микрофасеточное зеркало, сделанное инструментом, показанным на рисунке. Радиус вершины алмазного инструмента составляет  $10\ \mu\text{m}$ , тогда как радиус перехода между отдельными гранями оптического элемента  $15\ \mu\text{m}$ . Отдельные грани были выполнены благодаря линейным направляющим.



**Bild 5. Bearbeitung der ersten Mikrolinse eines Mikrolinsenarrays mit genauen Anforderungen an die Position des Mikrolinsenarrays 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

Bilder: Kugler

Рисунок 5. Обработка первой микролинзы микролинзового массива с точными требованиями к позиции микролинзового массива в отношении наружного контура детали

В зависимости от размера отдельных линз линзового массива, структура может быть сделана непосредственно алмазом. Тем не менее, сначала также может быть изготовлена грубая форма линзы, затем обработана алмазом. В этом случае один из контуров линзы перемещается на плоскую подложку из двух линейных осей. Если радиус линзы больше, чем радиус инструмента, путь оптического качества помещается рядом с другим пошаговым перемещением третьей линейной оси. Необходимая подача определяется только радиусом вершины алмазного инструмента и допустимой шероховатостью. Также нужно принять во внимание, что фактически достигаемая шероховатость обычно больше, чем кинематическая шероховатость, заданная подачей и радиусом. Следовательно, допустимая шероховатость, по которой определяется подача, должна быть, по крайней мере, в два раза меньше, чем фактически допустимая шероховатость. Здесь также шероховатость обычно не определяется кинематической шероховатостью (радиус инструмента и подача). На это в равной степени влияют другие эффекты, например, распределение размера зёрен в материале и анизотропные свойства монокристаллов материала.

Еще одним преимуществом изготовления оптических поверхностей на станке с многоосевой обработкой является возможность легко измерить компоненты без вращательной симметрии. Типичные ультра-прецизионные токарные станки имеют системы датчиков для определения радиального и осевого биения осесимметричных компонентов, но

обычно не представляется возможным измерить детали без соответствующего согласования симметрии (**Рис. 5**).

#### АВТОР

Dipl.-Ing. ROLAND BOHR работает в компании Kugler GmbH в Салеме 10 лет, среди прочего, в качестве инженера в областях микротехнологий, экологически чистой сборки и технологии микросистем; roland.bohr@kugler-precision.com