

# Der Span erobert die Mikrosystemtechnik

Spanende Fertigung mit optischer Qualität und Montage im Mikrometerbereich

MARKUS VOS, MANFRED WECK

**M**iniaturisierte Sensoren werden bereits in Massenartikeln eingesetzt und können zu erheblichen Kostenvorteilen führen. Besonders in der Nachrichtentechnik, wo grosse Informationsdichten mit Lichtwellenleitern übertragen werden, fehlen jedoch Mikrosysteme, die eine Ankopplung von Informationsverarbeitung und Lichtwellenleiter erlauben. Vielfach wird neben den Abmessungen im Mikrometerbereich zusätzlich eine optische Qualität der Oberfläche gefordert.

Lithografische Verfahren, besonders das LIGA-Verfahren, aber auch Ätzprozesse und die Laserbearbeitung werden bereits erfolgreich zur Herstellung von Mikrokomponenten eingesetzt. Neben Verfahren, die aus der Mikroelektronik in die Mikromechanik übertragen wurden, stellt sich die Frage, inwieweit mit konventionellen Fertigungsverfahren wie Drehen, Bohren oder Fräsen eine Herstellung von Bauteilen mit Abmessungen im Mikrometerbereich möglich ist, die gleichzeitig optische Funktionsflächen besitzen.

Ultrapräzisionsmaschinen sind heute in der Lage, Bauteile mit Mass- und Formgenauigkeiten im Submikrometerbereich und Rauheiten von wenigen Nanometern ( $R_a$  ca. 2 nm), das heisst spiegelnde Oberflächen, spanend zu bearbeiten, so dass diese Ergebnisse auf die Mikrostrukturtechnik übertragen werden können.

Im Gegensatz zu Verfahren, die mit röntgenlithografischen Masken arbeiten, können mit konventionellen spanenden Verfahren 3D-Strukturen in einem Arbeitsgang auf einfache Weise hergestellt werden. So können mit lithografischen Verfahren Strukturen ähnlich wie bei Laubsägearbeiten im Mikrometerbereich in einer Ebene hergestellt werden. Strukturen in der dritten Raumrichtung können jedoch nur in aufwendiger Mehrschichttechnik

erzeugt werden. Ein weiterer Nachteil der lithografischen Verfahren sind die hohen Herstellungskosten für die Masken, die zur Belichtung benötigt werden, so dass diese Verfahren zur Herstellung kostengünstiger Kleinserien und Einzelstücke nicht geeignet sind.

Mit Hilfe der Mikrozerspanung können kostengünstig Kleinserien von Mikrostrukturen und Prototypen in einer breiten Palette von Materialien – zum Beispiel NE-Metalle oder Kunststoffe – spanend hergestellt werden, die über Oberflächen mit optischer Qualität verfügen und im Bereich der Informationsverarbeitung direkt eingesetzt werden können.

## Bearbeitungsmaschinen

Die Mikrozerspanung stellt hohe Anforderungen an das Maschinenverhalten, denn die Werkstückkontur wird neben den technologischen Parametern durch das geometrische Verhalten der

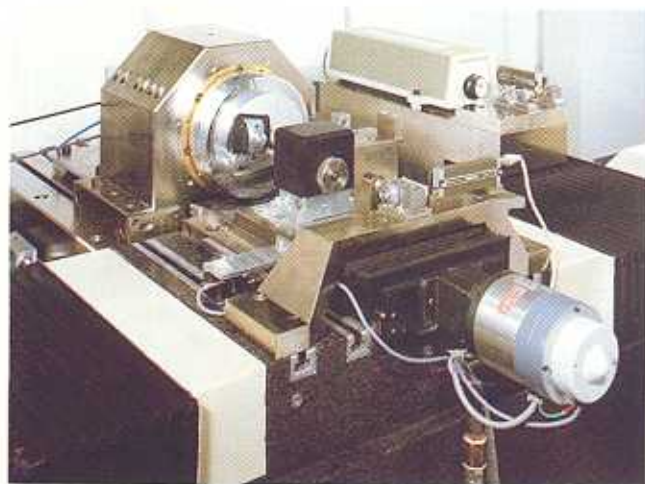


Bild 1. Ultrapräzisionsdrehmaschine UPM1. (Bild: IPT)

Maschine stark beeinflusst. So können Mikrostrukturen nur auf Maschinen hergestellt werden, die über geeignete Lagerungen verfügen. Ist der Rundlauffehler der Drehspindel grösser als die gewünschte Konturgenauigkeit, können diese Strukturen mit einer solchen Spindel nicht hergestellt werden. Ebenso werden hohe Anforderungen an das Positionsverhalten der Linearachsen gestellt, da nur so die Werkstückkontur im Submikrometerbereich abgefahren werden kann.

Bearbeitungsversuche zur Herstellung von Mikrokomponenten wurden auf einer Ultrapräzisionsdrehmaschine durchgeführt. Diese Drehmaschine verfügt über eine luftgelagerte Spindel und über Linearführungen, die frei von Stick-Slip sind und nur geringste Geradheits- bzw. Rundlaufabweichungen aufweisen. Mit einem interferometrischen Laserwegmesssystem wird die Position des Diamantwerkzeugs mit einer Auflösung von 10 nm erfasst. Nur so kann die Kontur mit der für Mikrostrukturen geforderten Genauigkeit gefertigt werden. Diese hohen Anforderungen an die Maschineneigenschaften werden heute von nur wenigen Ultrapräzisionsmaschinen erfüllt. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) wurde eine Ultrapräzisionsdrehmaschine konstruiert und aufgebaut, die die Herstellung von Mikrostrukturen durch konventionelle Fertigungsverfahren ermöglicht (Bild 1).

## Werkzeuge für die Mikrozerspanung

Die Bauteilgeometrie wird einerseits durch die Maschineneigenschaften beeinflusst, andererseits spielt das Werkzeug eine entscheidende Rolle. Für die Bearbeitung von Nichteisenmetallen werden bei der Mikrozerspanung Naturdiamantwerkzeuge eingesetzt. Nur der Naturdiamant lässt sich mit der für die Mikrozerspanung benötigten Genauigkeit anschleifen. Die Schneidkantenschärfe und die -verrundung sind massgebend für die Fertigungsqualität am Werkstück.

Beispielhaft ist in Bild 2 ein Naturdiamantwerkzeug dargestellt. Es hat einen Schneidkantenradius von nur 2,4 µm, der mit kleinsten Abweichungen von der Kreisform gefertigt wird. Bei Fräs-

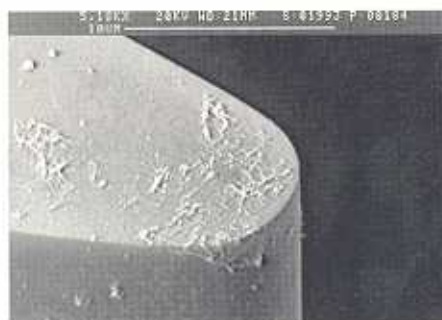


Bild 2. Diamantdrehwerkzeug. (Bild: IPT)



Bild 3. Welle mit Mikrometerabmessungen. (Bild: IPT)



Bild 4. Asphärische Pressform. (Bild: IPT)



Bild 5. Prüfwerkstück. (Bild: IPT)

bearbeitung werden vorwiegend Formwerkzeuge eingesetzt, so dass die Kontur bereits über das Werkzeug vorgegeben wird.

## Bearbeitungsversuche

Schon bei den ersten Versuchen konnten Mikrostrukturen erzeugt werden, die weit unterhalb bisher bekannter, minimaler Strukturgrößen liegen. Bei der Fertigung einer gestuften Welle aus Messing konnte ein Wellendurchmesser von 8 µm erreicht werden. Bild 3 zeigt eine mit der Mikrodrehbearbeitung hergestellte Welle mit Absatz.

Diese Welle (Durchmesser 8 bzw. 50 µm) befindet sich auf einer nur 20 µm starken Membrane, so dass sie mit dieser ein schwingungsfähiges System bildet, das beispielsweise für die Messung von Beschleunigungen eingesetzt werden kann. Ohne Masse können Mikromembranen, etwa für Drucksensoren, spanend gefertigt werden. Weiter verfügt die Welle in weiten Bereichen der Oberflächen über optische Qualität. Andere Formen sind ebenfalls auf einer Membrane zu fertigen, so dass Spiegel über diese Mikromembrane zugestellt werden können.

Auch bei der Fertigung von gedrehten asphärischen Pressformen konnten interessante Ergebnisse erzielt werden. Die in Bild 4 gezeigte asphärische Struktur konnte über die Maschinensteuerung abgefahren werden. Die Gesamtabmessungen der Struktur betragen nur 0,07 × 0,015 mm.

Ein anderes spanendes Verfahren, das sich zur Herstellung von Nuten anbietet, ist das Fräsen. Nuten werden mit einem Formwerkzeug in eine nickelbeschichtete Oberfläche gefräst. Die Strukturhöhe beträgt 0,07 mm.

Diese Nuten können einerseits zur Verbindung von Lichtleiterfasern genutzt werden, indem in die Nuten jeweils ein Ende einer Lichtleiterfaser eingelegt wird. Andererseits können auf diese Weise Oberflächen strukturiert werden, so dass zum Beispiel der Wärmeübergang oder die Fläche in biochemischen und chemischen Katalysatoren vergrößert wird.

Zur Überprüfung der Fähigkeit, auch komplexe Strukturen spanend herzustellen, wurde das Prüfwerkstück in Bild

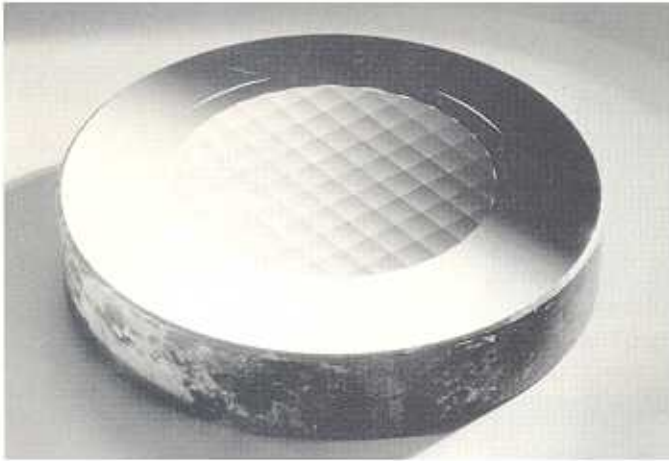


Bild 6. Facettenspiegel.  
(Bild: IPT)

5 gedreht. Es besteht aus verschiedenen zylinderförmigen Abschnitten sowie aus kegel- und torusförmigen Teilbereichen. Eine solche Geometrie ist mit den bekannten Verfahren aus der Halbleitertechnik nicht herstellbar.

Das Prüfwerkstück zeigt eine ausgeprägte Gratbildung an den Querschnittübergängen, die materialbedingt sind. Wie erste Versuche zeigen, kann durch die Verwendung eines amorphen Materials, beispielsweise Nickel, die Gratbildung deutlich reduziert werden, so dass durch eine Optimierung der technologischen Parameter noch deutlich bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

## Fast Tool – das schnelle Werkzeug für besondere Aufgaben

Die Entwicklung von neuen Maschinenkomponenten für die Hoch- und Ultrapräzisionstechnik ist ein Schwerpunkt des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie. Ein Beispiel ist der Aufbau einer hochfrequenten Werkzeugzustelleinheit (Fast-Tool-System), die zur Herstellung von Optiken mit Strukturgrößen im Mikrometer- und Nanometerbereich erfolgreich eingesetzt wird.

Eine Ultrapräzisionsdrehmaschine wird adaptiv mit dem Fast-Tool-System ausgerüstet, Änderungen an der Maschine sind dazu nicht notwendig. Das hochfrequent bewegte Werkzeug erlaubt es, Flächen zu erzeugen, die mit keinem anderen Verfahren herzustellen sind. Bild 6 zeigt als Beispiel einen oberflächenstrukturierten Laserspiegel, der als Laserintegrator bereits zur Erhöhung

der Strahlqualität in Hochleistungslasern eingesetzt wird. Die Oberfläche des Spiegels besteht aus einem rotationsymmetrischen Anteil, dem ein nichtrotationsymmetrischer mit 90 Facetten überlagert ist.

Das Diamantdrehwerkzeug auf der Ultrapräzisionsdrehmaschine wird zusätzlich zu den vergleichsweise langsamen Bewegungen der Maschinenachse hochfrequent mit bis zu 3 kHz im Mikrome-

terbereich positioniert. Somit addieren sich die Bewegungen des Werkzeugs und der Maschinenachsen.

Wird die Position des Fast-Tool in Abhängigkeit von der momentanen Winkelposition des Werkstücks (Drehzahl 200 min<sup>-1</sup>) und der Werkzeugposition im Bearbeitungsraum festgelegt, können auf einer Drehmaschine nichtrotationsymmetrische Werkstücke gefertigt werden.

Während das gegenwärtig eingesetzte Fast-Tool mit einem Piezoquarz positioniert wird und daher zwar grosse Stellfrequenzen, aber geringe Hübe realisiert (Hub 35 µm bei 1 kHz), wird bereits an einem System mit reduzierter Dynamik und wesentlich grösseren Zustellungen gearbeitet (Hub 1 mm bei 50 Hz). Als Antrieb wird bei diesem System ein Linearmotor eingesetzt.

Eine Kombination beider Antriebselemente wird es in Zukunft ermöglichen, komplexe Mikrostrukturierungen an Oberflächen vorzunehmen. Einsatzgebiete dieser Strukturen sind neben Laserspiegeln hydrodynamische und aero-



## Literatur

- 1 Weck M., Schröder H. B., Ostendarp H., Vos M., Wieners A.: Präzision und Leistung, Kostenbewusste Optimierung von Maschinen und Anlagen, Messen, Prüfen, Automatisieren, Heft 11/12, Nov. 1994, b-quadrat Verlagsgesellschaft, Kaufering, ISSN 0945-7143
- 2 Pyra M.: Nichtrotationsymmetrische Laserspiegel. Diss. RWTH Aachen 1994, Verlag Shaker, Aachen, ISBN 3-86111-877-7
- 3 Firmenprospekt VisiTec Microtechnik GmbH Grevesmühlen 1995
- 4 Mikrosysteme – ein Schlüssel für die Zukunft, Daimler-Benz AG, 1992
- 5 Neue Prozesstechniken in der Mikromechanik; aus «Mikromechanik», S. 230–234, Springer-Verlag, 1989
- 6 Drost S., Endres H.-E.: Micro System Technologies 91, S.61-69, VDE-Verlag, 1991
- 7 Heuberger A.: Mikromechanik, Springer-Verlag, 1989
- 8 Ruprecht R.: KfK-Bericht 4825 Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1991
- 9 Mohr J. et. al.: Micro System Technologies '90, S.529, Springer-Verlag, 1990
- 10 Nölscher C.: VDI-Bericht 935, S. 61, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- 11 Rogner A. et al.: Micromechanik, Microengineering 1, S.167, 1991
- 12 Luderich J.: Vortrag, Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie, 1994
- 13 Hümmler J.: Ergebnisbericht, Mikromontage Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT), Aachen