

# Integrierte Prozessketten in der Mikrofertigung

Neue Fertigungsmethoden im Mikromaschinenbau

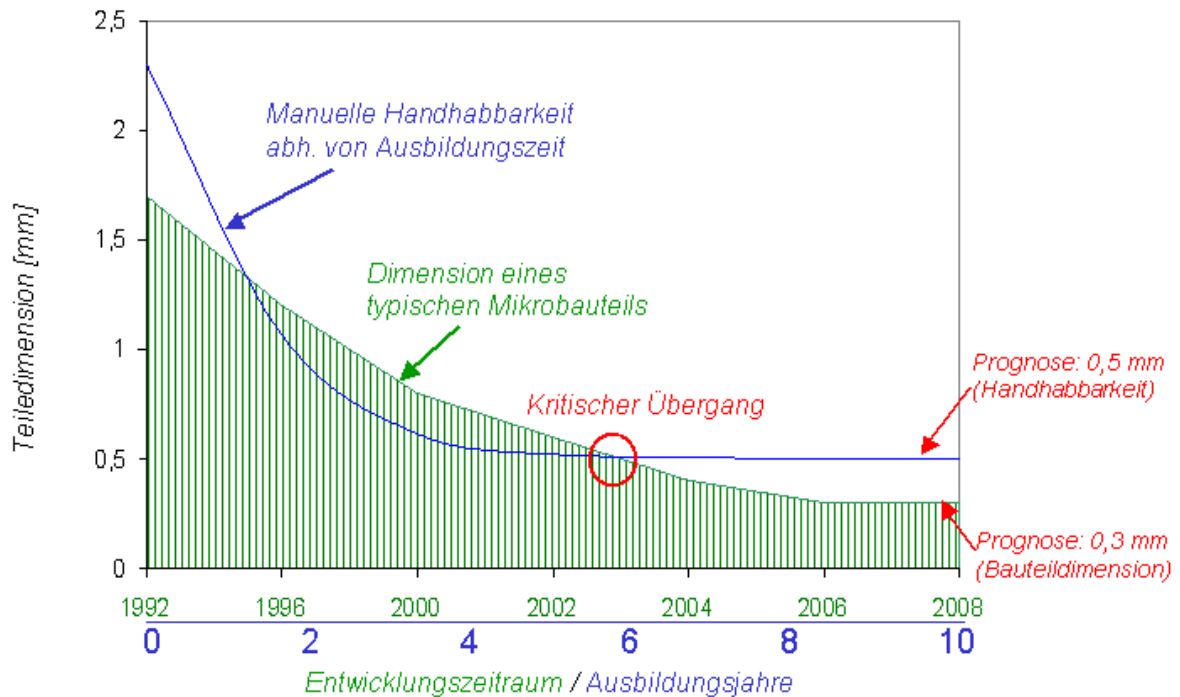
Jens P. Wulfsberg, Jörg Lehmann, Hamburg

Die Verfahren zur Herstellung kleiner Strukturen im Bereich weniger Mikrometer entstammen ursprünglich dem Bereich der Mikroelektronik. Hier werden überwiegend  $2^{1/2}$ -dimensional arbeitende Verfahren eingesetzt, die auf Technologien der Lithographie oder Galvanik beruhen. Durch geschickte Verfahrenskombinationen ist es heute mit diesen Verfahren auch möglich, integrierte mikromechanische Systeme auf Siliziumbasis herzustellen. Integrierbar sind ebenfalls mikrooptische oder mikrofluidische Funktionen. Neben dieser Erweiterung der Verfahren, existiert aber ein zunehmender Druck, die klassischen Verfahren der Fertigungstechnik zu skalieren und diese so für die Herstellung miniaturisierter hybrider Systeme des Mikromaschinenbaus zu qualifizieren. Auch hier werden neben mechanischen Funktionen Elemente der Mikrooptik oder Mikrofluidik gefordert. Im Gegensatz zu den integrierten Mikrosystemen, die auf Verfahren der Mikrosystemtechnik beruhen, wird für den Aufbau der zuletzt genannten „Mikromaschinen“ jedoch ein wesentlich breiteres Werkstoffspektrum zur Erfüllung der spezifischen Anforderungen gefordert.

## Einführung

Die Weiterentwicklung und Minaturisierung der Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikrobauteilen rückt immer weiter in das Interesse der universitären und industriellen Forschung [1, 2]. Insbesondere Unternehmen der Feinwerk-, Sensortechnik oder der Optik erfahren einen zunehmenden Druck zur Nutzung qualifizierter Verfahren zur Herstellung kleiner Bauteile. Wesentliche Triebkraft zur Miniaturisierung der Einzelteile hybrider mikromechanischer Systeme ist die internationale Konkurrenz zwischen den Unternehmen und der dadurch entstehende Druck zur Entwicklung innovativer Produkte. Der Innovationsgrad von neuen Produkten der Feinwerktechnik wird aber wesentlich durch die Miniaturisierung und die Funktionsdichte in einem Produkt bestimmt. Beispielhaft sei hier die Medizintechnik genannt, wo z.B. in der Endoskopie das Ziel der Miniaturisierung durch den Willen zur Senkung der Invasivität der medizinischen Prozedur bestimmt ist.

Neben den Fertigungsverfahren sind aber auch die Handhabungsverfahren von enormer Wichtigkeit, da die immer kleineren Einzelteile der entwickelten hybriden Systeme äußerst schwierig manuell zu handhaben sind und die Qualität der Handhabung und Montage erheblich von der Erfahrung und dem Ausbildungsstand der Mitarbeiter abhängen. In einer internen Studie des Laboratoriums Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg wurde festgestellt, dass es eine minimale Bauteilgröße gibt, ab der auch gut ausgebildetes Personal nicht mehr in der Lage ist, die Einzelteile zu verarbeiten. In Bild 1 sind die Entwicklung der Bauteilgröße und die Mitarbeiterlernkurve jeweils über der Zeit dargestellt. Der Schnittpunkt der Kurven ergibt eine minimale Bauteilgröße, die mit den heutigen Verfahren der Handhabungs-, Aufbau- und Verbindungstechniken gerade noch verarbeitet werden können. Die Abbildung zeigt weiterhin die beispielhafte Entwicklung der Abmessungen eines ausgewählten Einzelteils in einem feinwerktechnischen Produkt. Man erkennt in dieser Darstellung, dass für diese spezielle Konstruktion die Potentiale für die Entwicklung weiter miniaturisierter Produkte durch die eingesetzten Fertigungs- und Montageverfahren limitiert werden.



**Bild 1:** Entwicklung der Bauteilgröße und die Mitarbeiterlernkurve über der Zeit

## Mikromaschinenbau

Bei den Produkten des Mikromaschinenbaus handelt es sich um hybride Systeme, die aus Einzelteilen, die vorher gefertigt wurden, montiert und gefügt werden. Die Produkte enthalten, wie die Produkte des konventionellen Maschinenbaus, elektronische oder optische oder fluidische Komponenten. Zur Verwendung kommen Ingenieurwerkstoffe, wie sie auch im konventionellen Maschinenbau zum Einsatz kommen. Hierzu gehören z.B. hochlegierte Stähle, Kunststoffe und Keramiken. Mit den formgebenden Verfahren können echte 3-d Geometrien hergestellt werden (Bild 2). Die Größenordnung der Einzelteile liegt dabei zwischen den Größenordnungen der Mikrosystemtechnik und denen der Feinwerktechnik, ist also größer als 0,05 mm und kleiner als 1 mm. Selbstverständlich gibt es Überlappungsbereiche zwischen dem Mikromaschinenbau einerseits und der Mikrosystemtechnik und Feinwerktechnik andererseits [3].

Ein wesentlicher Nachteil der Verkettung skalierter Fertigungsverfahren des Mikromaschinenbaus ist es, das die Einzelteile den Arbeitsraum und das Koordinatensystem der Bearbeitungsmaschinen nach den einzelnen Fertigungsschritten verlassen und somit die geometrische Referenz zwischen Mikroteil und Bearbeitungsmaschine oder Bearbeitungsprozess verloren geht. Dies ist verbunden mit einem erheblichen Aufwand für die erneute Vereinzelung, Orientierung, Positionierung und das Spannen der Teile für den nachfolgenden Bearbeitungsschritt. Hierbei kommt es zu Fehlern, z.B. zu Positionier- und Spannfehlern, die die Bauteilqualität oder die minimale Bauteilgröße, die noch gefertigt werden kann, limitiert.



**Bild 2:** Formgebende Verfahren des Mikromaschinenbaus

Hier bieten die Methoden in Anlehnung an die Mikrosystemtechnik Vorteile (Bild 2). Neben der höheren Auflösung der Fertigungsverfahren ist in der Mikrosystemtechnik insbesondere der Aufbau integrierter Prozessketten möglich. Das bedeutet, dass das Werkstück, in diesem Fall das Mikrosystem, die Referenz zur Fertigungseinrichtung nicht verliert. Bei Mikrosystemen, die aus mehreren Einzelteilen bestehen, bleibt auch die Referenz der Teile zueinander stets erhalten. Ursache hierfür ist die Fertigung der Mikrosysteme über mehrere Prozessschritte in einer Aufspannung. Diese wird z.B. dadurch realisiert, dass sich alle zum integrierten Mikrosystem gehörigen Komponenten stets auf einem Substrat befinden und nicht wie in der konventionellen Feinwerktechnik üblich, nach der Formgebung zunächst vereinzelt werden.

Im Folgenden soll deshalb ein Ansatz zur Kombination der im Bild 2 beschriebenen spezifischen Vorteile beider genannten Prozessketten beschrieben werden.

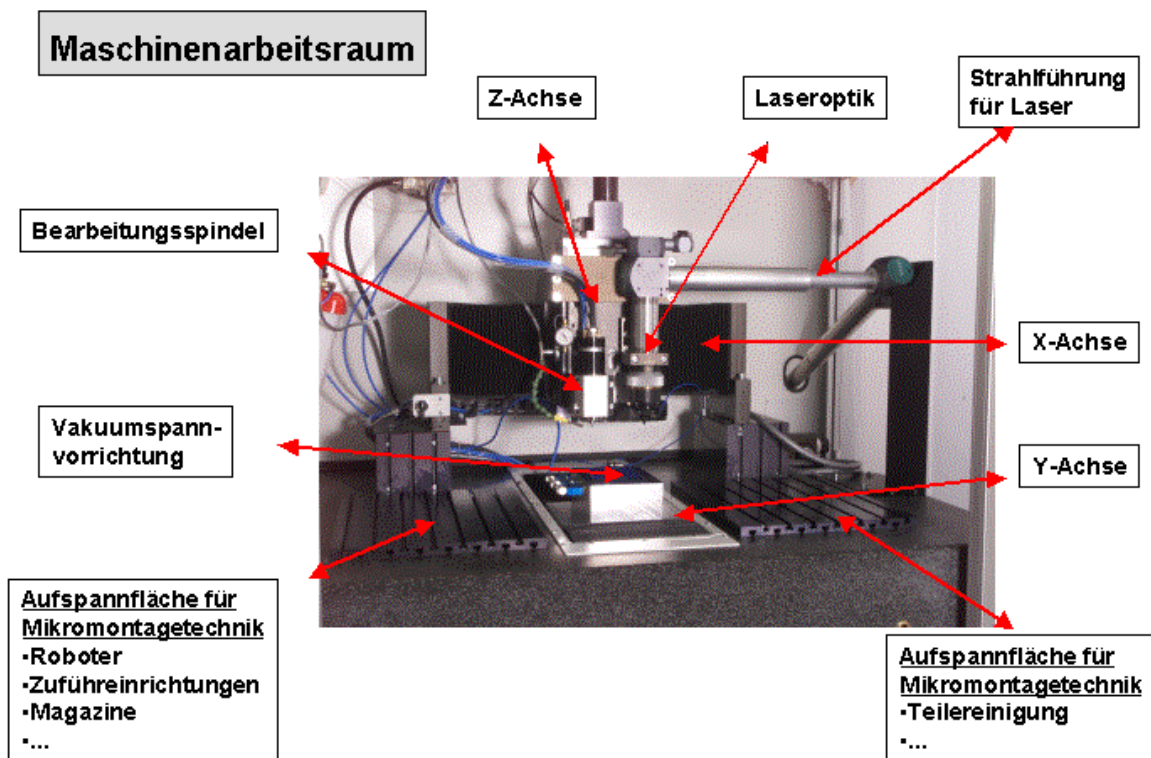
### **Integrierte Prozessketten im Mikromaschinenbau**

Im Zusammenhang mit den hier beschriebenen Methoden zum Aufbau integrierter Prozessketten soll zunächst eine Beschränkung auf die Basistechnologien Mikrozerspannung und Laserbearbeitung stattfinden. Analoge Überlegung unter Einbeziehung weitere Technologien, wie der Funkenerosion oder anderen abtragenden oder fügenden Verfahren sind möglich und sinnvoll.

Die Fertigung von einzelnen Bauteilen des Mikromaschinenbaus erfordert hochgenaue Werkzeugmaschinen für die Einzelprozesse. Hier sind heute Auflösungen der

Wegmesssysteme von 10 nm und Positioniergenauigkeiten von 100 nm möglich. Wegen der kleinen Werkzeugdurchmesser muss zur Erzielbarkeit ausreichender Schnittgeschwindigkeiten außerdem eine Bearbeitungsspindel mit entsprechend hoher Drehzahl verfügbar sein. Bei Mikrofräsmaschinen kommen zur Zeit Hochleistungsspindeln mit Drehzahlen von bis zu 160000 U/min zum Einsatz. Im Bereich der Laserbearbeitung hängt die erzielbare minimale Strukturgröße von der Laserwellenlänge, der Fokussierbarkeit und der Einkoppelbarkeit der Laserstrahlung in den Werkstoff ab. Werkzeugmaschinen, die den genannten Anforderungen entsprechen, sind z.B. in [4, 5] beschrieben.

Wenn man aufgrund der vorhandenen Fertigungseinrichtungen das Genauigkeitsproblem auf der Maschinenseite als gelöst betrachtet, so beinhaltet ein Wechsel der Bearbeitungstechnologie im Rahmen der Herstellung der Fertiggeometrie des Mikroteils immer noch einen Maschinenwechsel und somit auch einen Verlust der Referenz zwischen Bauteil und Maschine. Die Folge ist eine Einbuße an Genauigkeit bei der Bauteilfertigung. Damit die geforderten Genauigkeiten nach einem Technologie- und somit auch einem Maschinenwechsel garantieren werden können, muss ein hoher technischer Aufwand getrieben werden, um die Lage des Bauteils in der Folgemaschine zu erfassen.



**Bild 3:** Arbeitsraum der realisierten Mikrobearbeitungsmaschine

Merkmale der „Integrierten Prozessketten“, mit denen diese Problematik gelöst werden kann, sind in [6] beschrieben. Die dazu nötige Bearbeitungsmaschine stellt zwei oder mehr Bearbeitungstechnologien in ihrem Arbeitsraum, also in einem Maschinenkoordinatensystem zur Verfügung, so dass bei einem Wechsel der Bearbeitungsverfahren kein Maschinenwechsel nötig ist. Das zu bearbeitende Bauteil muss somit auch nicht mehr aus der Maschine und aus der Einspannung entnommen werden, sondern bleibt weiterhin im Referenzsystem der

Maschine. Bild 3 zeigt die in Zusammenarbeit mit den Firmen Kugler (Salem) und Lasag (Thun) am Laboratorium Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg realisierten Maschine, in der zunächst zwei Basistechnologien eingesetzt werden können. Hierbei handelt es sich um die spanabhebenden Verfahren

- Fräsen
- Bohren
- Drehfräsen

sowie die laserbasierten Verfahren

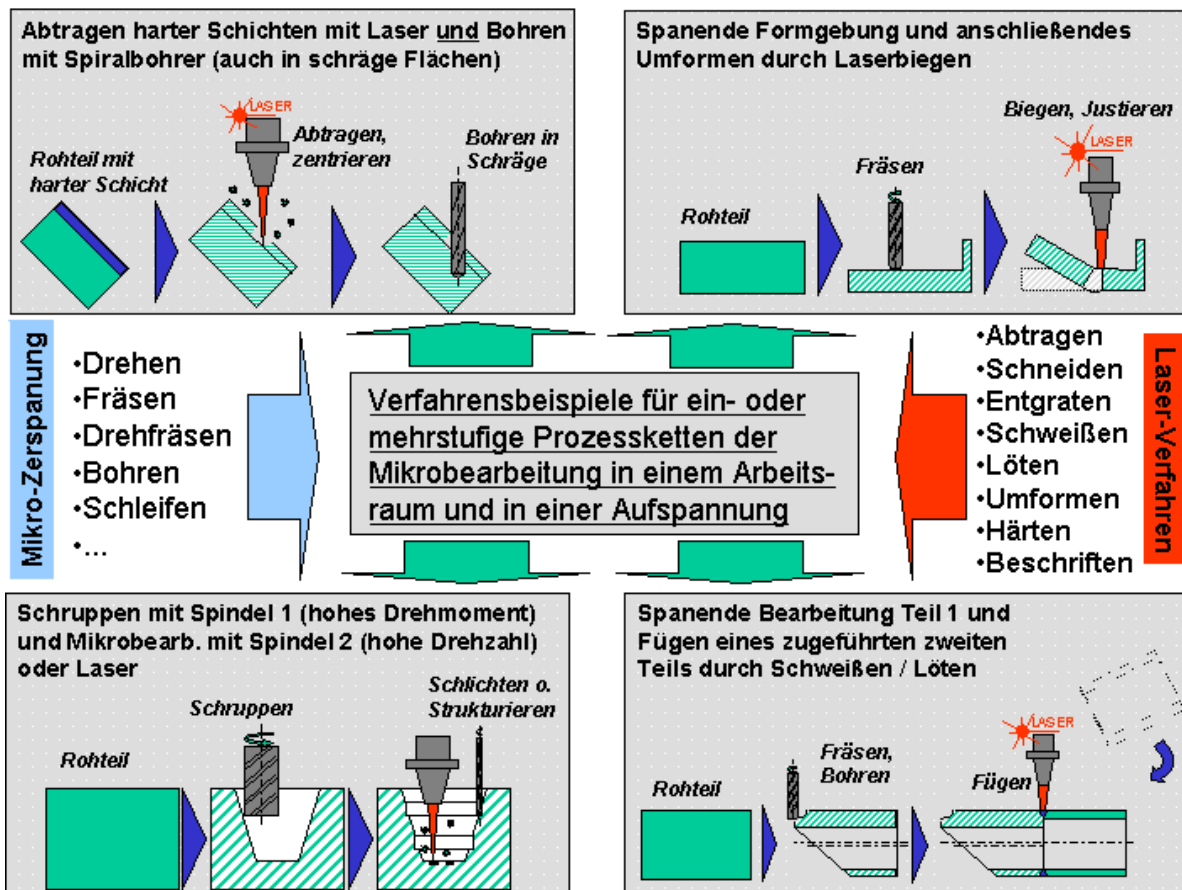
- Abtragen, Bohren, Entgraten
- Schneiden
- Schweißen, Löten
- Markieren, Beschriften

Im Rahmen der hier beschriebenen Maschine wurde ein Nd-YAG Laser der Wellenlänge 1064 nm mit einer mittleren Leistung von 200 Watt verwendet. Der minimale Fokusbereich beträgt 60 µm. Entsprechend kleine Geometrieelemente (Schnitte, Bohrungen) können realisiert werden. Die Einhaltung der Lagegenauigkeit von Geometrieelementen zueinander, die durch mehrere der genannten Verfahren an einem Werkstück erzeugt wurden, ist bei diesem Ansatz nur von der Vermessung des Abstandes zwischen Bearbeitungsspindel und Laseroptik abhängig. Ein Technologiewechsel stellt somit nur noch einen Offset in den Verfahrenswegen der Achsen dar und für die Durchführung der Bearbeitung einen Wechsel in der Ansteuerung zwischen Spindel und Laserquelle. Die Genauigkeit bei der Bauteilfertigung ist somit nur von der Positioniergenauigkeit der Maschine abhängig, die aber bei den auf dem Markt befindlichen Maschinen als ausreichend vorausgesetzt werden kann.

In Bild 4 sind Beispiele für integrierte Prozessketten dargestellt, die sich mit der vorgestellten Fertigungseinrichtung für integrierte Prozessketten realisieren lassen. Die Beispiele stellen lediglich zweistufige Prozessketten dar, aufgrund des einfachen Technologiewechsels ist aber auch die Bildung mehrstufiger Prozessketten möglich. Auf diese Weise lässt sich eine Komplettbearbeitung des Mikroteils in einer Aufspannung realisieren. Auf Grund konkreter Bauteile aus den Bereichen Mikro-Werkzeugbau und Medizintechnik werden derzeit Prozessketten ausgelegt.

### **Beispiele für integrierte Prozessketten**

Das Einbringen von schrägen Bohrungen durch Zerspanung in Werkstücke, die u.U. randschichtgehärtet sind, stellt ein Problem dar. Hier soll eine Vorbearbeitung mit dem Laser zur Erzeugung einer für den Bohrvorgang orthogonalen Oberfläche ein Verlaufen und Brechen des Bohrers verhindern. Dazu wird zunächst die harte Randschicht durch den Laser abgetragen.



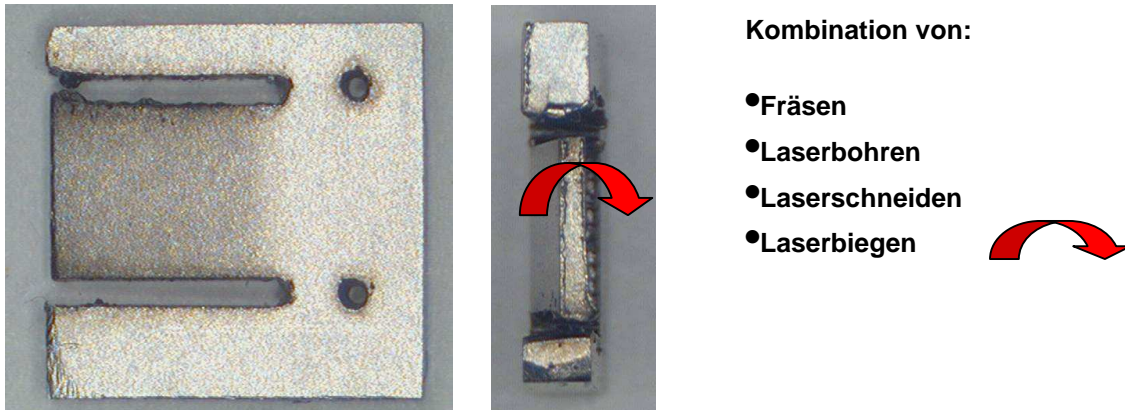
**Bild 4:** Beispiele für integrierte Prozessketten

Die Verknüpfung der Fräsbearbeitung und des Laserumformens [7] stellt eine Möglichkeit dar, an Bauteilen komplexe Justageaufgaben vorzunehmen oder neue Funktionen einzubringen. Hierzu gehört die Entwicklung sogenannter „snap in – Elemente“ im Mikrobereich, wie sie z.B. in der Kunststofftechnik schon bekannt sind. Dies eröffnet grundsätzlich neue, einfache formschlüssige Fügeverfahren in mikrotechnischen Produkten, wie die einfache Montage optischer oder elektronischer Elemente in hybriden Mikrosystemen, z.B. im Endoskopen. Ein erstes Bauteil, an dem Fräs-, Bohr-, Laserschneid- und Laserbiegeoperationen durchgeführt wurden, ist in Bild 5 gezeigt.

Für den Mikro-Werkzeugbau werden in der Maschine Schrupp- und Schlichtoperationen kombiniert. Mit der Frässpindel wird in kurzer Zeit mit hohem Zeitspanvolumen eine Vorgeometrie der Mikroform erzeugt. Danach erfolgt die Einbringung kleiner Substrukturen mit dem Laser. Das Beibehalten der Referenz des Werkstückes im Arbeitsraum gewährleistet dabei die genaue relative Lage der vorbearbeiteten Struktur zu den Substrukturen.

Aus der konventionellen Fertigung sind bereits Prozessketten zum Fügen von Bauteilen direkt nach der Herstellung der Einzelteile im Arbeitsraum einer Maschine bekannt. Hierzu zählen kraftschlüssige Verbindungen durch Einpressen [8, 9]. In dem hier beschriebenen neu entwickelten Maschinenkonzept sollen stoffschlüssige Verbindungen von Mikro-Einzelteilen zu hybriden Mikrosystemen realisiert werden. Als Fügeverfahren sollen das Laserschweißen und das Laserlöten eingesetzt werden. In Bild 4 ist ein Demonstratorbauteil gezeigt, in dem ein in der Maschine hergestelltes Zerspanteil mit einem von Außen zugeführten Teil gefügt wird. Denkbar sind jedoch auch Prozessketten, in denen zwei in der Maschine hergestellte Mikroteile gefügt werden. Die hierfür notwendige Handhabungstechnik

zum „Parken“ eines Teils, während der zweite Fügepartner gefertigt wird befindet sich derzeit gemeinsam mit anwendenden Industrieunternehmen in der Entwicklung



**Bild 5:** Demonstratorbauteil für Fräs-, Bohr-, Laserschneid- und Laserbiegeoperationen

Neben den beschriebenen technischen Vorteilen bringt dieses Maschinenkonzept auch wirtschaftliche Vorteile mit sich. Durch die beschriebene Komplettbearbeitung der hybriden Mikrobaugruppen werden die fertigungsablaufbedingten Liegezeiten [6, 10] wesentlich gesenkt. Diese haben einen dominanten Einfluss auf die Gesamtdurchlaufzeit der Baugruppe durch die Fertigung. Hierdurch kann eine Kostensenkung erreicht werden, weil die Umlaufbestände und der Steuerungsaufwand verringert werden. Hauptvorteil ist jedoch die bessere Reaktionsfähigkeit des Unternehmens auf die eingehenden Kundenaufträge.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das neu entwickelte Fertigungskonzept für die Herstellung hybrider Mikrobaugruppen bietet technische und wirtschaftliche Vorteile. Insbesondere metrologische Vorteile sind zu nennen, weil die Bearbeitung kleiner Baugruppen mit höherer Genauigkeit und mit geringeren Toleranzen durchgeführt werden kann. Ursache hierfür ist, dass das Werkstück, die Einzelteile einer Baugruppe oder die Baugruppe selbst den Arbeitsraum und damit das Koordinatensystem der multifunktionalen Fertigungseinrichtung und damit das Referenzsystem nicht verlassen muss.

Zukünftig werden für eine erweiterte Prozesskettenbildung Handhabungsfunktionen in den bestehenden Arbeitsraum integriert [3]. Zudem ist das Problem der modularen, universellen Spanntechnik für Mikroteile zu lösen.

Literatur:

- [1] Weule, H.; Hüntrup, V.; Thies, U.; Schünemann, M.; Bierhals, R.:  
Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung  
wt Werkstattstechnik 89 (1999) H.11/12, S 481 – 484
- [2] Weck, M.; Fischer, S.:  
Maschinenentwicklungen für die Mikrotechnik  
wt Werkstattstechnik 89 (1999) H.11/12, S 489 – 491
- [3] N.N.  
Internetadresse: [www.mikromaschinenbau.com](http://www.mikromaschinenbau.com)  
Startseite des Portals MikroMaschinenbau.com, 7.11.2002

- [4] N.N.  
Brilliante Resultate  
NC-Fertigung 2-02 (2002), S 64 – 68
- [5] N.N.  
Uhrenmanufaktur setzt auf Höchstpräzision- Mikrofräs- und Bohrmaschinen  
VDI-Z 144 (2002), Nr. 5 – Mai, S 68 – 69
- [6] Wulfsberg, J.P.; Lehmann, J.; Witte, L.:  
Prozesskettenbildung im Mikromaschinenbau  
Tagungsband 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU-Ilmenau, 2002,  
S 211 - 212
- [7] Vollertsen, F.:  
Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen,  
Modellierung  
Verlag Meisenbach, Bamberg, 1996
- [8] Keller, K. Ch.:  
Hexapod für Mikrofügen und Mikromontage  
wt Werkstattstechnik 89 (1999) H.11/12, S 511 – 514
- [9] Thoben, R.:  
Parallelroboter für die automatisierte Mikromontage  
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 758, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999
- [10] Wiendahl, H.-P.:  
Betriebsorganisation für Ingenieure  
Hanser Verlag, München, 1997