

Mikromaterialbearbeitung durch spanabhebende und lasergestützte Verfahren

W. Pflöging, IMF; Th. Schaller, IMVT

Einleitung

Ein Werk aus dem vollen Material herauszuarbeiten, ist eine der ältesten Bearbeitungstechniken überhaupt. Ein Künstler „sieht“ seine Skulptur bereits im rohen Marmor- oder Holzblock: Er muss sie „nur“ noch herausarbeiten. Mit Meißel oder Schnitzmesser entfernt er unter Einsatz seines handwerklichen Geschicks alles überflüssige Material. Ein Schlag zuviel, ein Schnitt an der falschen Stelle, schon war seine Mühe vergeblich. Doch walten Sorgfalt und Können, wird am Ende das Werk den Meister loben. Wenn heute die Späne fliegen, ist die Technik moderner und schneller, am Grundprinzip hat sich aber nichts geändert: Das Werkstück entsteht „virtuell“ als CAD-Modell am Computer, und mit Hilfe von CNC-Bearbeitungszentren wird das Werkstück aus einem (Metall-) Block herausgearbeitet. Die heutige Fertigungstechnik lässt der Kunst meist wenig Raum im Produktionsalltag, doch braucht man immer noch ein profundes Wissen um Werkstoffe, Werkzeuge und Bearbeitungstechniken, damit sich die Ergebnisse sehen lassen können. Dies gilt auch und gerade für die mit bloßem Auge kaum mehr wahrnehmbaren Mikrostrukturen, die mit haarfeinen Werkzeugen „aus dem Vollen“ herausgearbeitet werden. Und bewegt man sich an den Grenzen des technisch Machbaren, kann man der spanabhebenden Bearbeitung dann doch wieder künstlerische Aspekte zuschreiben. Im Gegensatz zur mechanischen Bearbeitung, wo Werkzeug und Material in direktem Kontakt stehen, ist die Lasermaterialbearbei-

tung berührungslos und daher „verschleißfrei“. Die Dimension der Bearbeitungswerkzeuge ist vergleichbar, wenn man Laserfokussdurchmesser und Fräs Werkzeug betrachtet. Allerdings ist die Auswahl des Werkzeugs „Laser“, mehr noch als bei der mikromechanischen Bearbeitung, von vielen werkstoffspezifischen Faktoren abhängig. Für den Anwender kommt es darauf an, beide Werkzeuge sinnvoll und auf das Strukturierungsproblem angepasst, evtl. auch kombiniert mit anderen Technologien, einzusetzen.

Mikrobearbeitung durch spanabhebende Verfahren

Werkzeuge und Werkstoffe

In der Mikrobearbeitung werden Werkzeuge vor allem aus Hartmetall und Diamant eingesetzt. Aufgrund der Korngröße im Bereich einiger Mikrometer, neuerdings auch im Submikrometerbereich, besitzen Hartmetallschneiden bei weitem nicht die Qualität und die Schärfe von monokristallinen Diamantschneiden, bei denen um Größenordnungen kleinere Verrundungen erreicht werden können. Die Schärfe und Schartigkeit der Schneiden wirkt sich unmittelbar auf die erzielbare Oberflächengüte der Strukturen aus. *Hartmetallwerkzeuge* sind als Schaft- und Radiusfräser bis zu Durchmessern von minimal 100 µm marktgängig und werden wie ihre „großen Brüder“ mit den üblichen Hartstoffbeschichtungen angeboten. Die Verwendung noch kleinerer Werkzeuge ist auf-

grund der geringen mechanischen Stabilität nur im Einzelfall sinnvoll. Im Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) gelang die Herstellung von (Einschneiden-) Schaftfräsern mit Durchmessern unter 50 µm (Abb. 1, links); mit diesen Fräsern wurden Nuten bis zu einer minimalen Breite von 37 µm in Messing gefräst. Profilwerkzeuge können aus Wendeschneidplatten geschliffen oder auf Kundenwunsch individuell gefertigt werden. Durch die massive Gestalt eines Profilwerkzeuges lassen sich Schnittbreiten deutlich unter 100 µm realisieren. *Diamantwerkzeuge* sind im allgemeinen Werkstatteinsatz weniger verbreitet; besonders Mikrowerkzeuge sind, zumal in Dimensionen unter 0,5 mm, sehr empfindlich. Als Sonderanfertigung sind Einschneiden-Schaftfräser mit einem minimalen Durchmesser von 200 µm von spezialisierten Schleifereien lieferbar (Abb. 1, rechts). Anfang 2002 wurden sogar erste Diamantwerkzeuge für 100 µm Schnittbreite erfolgreich getestet. Für noch kleinere Strukturen muss man auch bei der Diamantbearbeitung auf Profilwerkzeuge zurückgreifen: Die kleinsten im IMVT eingesetzten Werkzeuge besitzen als Rechteckwerkzeuge eine Schnittbreite von 40 µm bzw. als V-Nutenfräser einen Spitzenwinkel von 15° bei Spitzenbreiten unter 10 µm. Hartmetallbohrer sind Standardwerkzeuge bis zu einem minimalen Durchmesser von 50 µm, und am unteren Ende der Skala stehen HSS-Bohrer mit 30 µm Durchmesser. Zu beachten ist, dass mit kleiner werdenden Durchmessern das Risiko eines Werkzeugbruchs stark steigt und der werk-

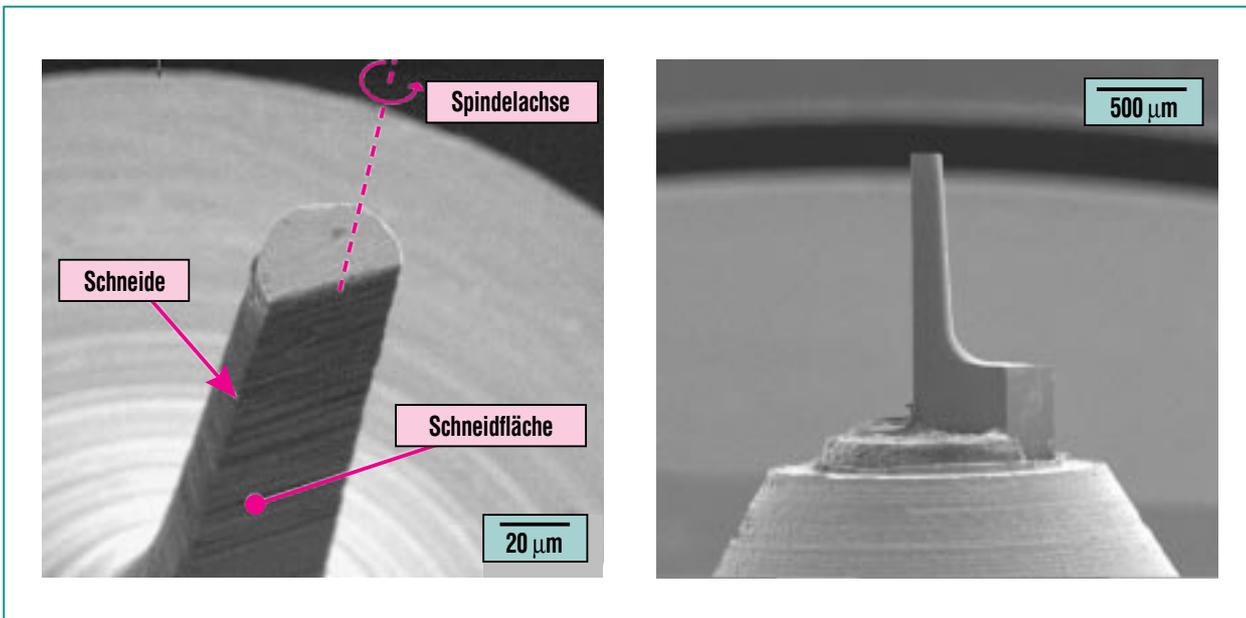


Abb. 1: Einschneiden-Schafffräser aus Hartmetall (links) für 50 µm Schnittbreite, und aus monokristallinem Naturdiamant (rechts) für 200 µm Schnittbreite.

stoffabhängigen Wahl der Bearbeitungsparameter eine entscheidende Bedeutung zukommt. Für reproduzierbare Ergebnisse kommt man zum Beispiel um CNC-Bohrzyklen und geeignete Zentrierungsmaßnahmen nicht mehr herum. Außer den lateralen Abmessungen von Mikrowerkzeugen ist auch das erreichbare Aspektverhältnis wesentlich. Grundsätzlich sollte man aus Stabilitätsgründen nie längere Werkzeuge einsetzen, als zur Strukturierung unbedingt nötig ist. Radiusfräser sind meist auf ein Aspektverhältnis nur knapp über 1 ausgelegt, mit Schafffräsern erzielt man gute Ergebnisse für Aspektverhältnisse bis 5, Profilfräser erlauben die Fertigung noch schlanker Strukturen bis Aspektverhältnis 10, und mit Bohrern sind Einzellöcher in noch größerem Aspektverhältnis herzustellen. Die Wahl der Werkzeuge und die Größe der damit zu er-

zeugenden Strukturen hängen ganz wesentlich vom zu bearbeitenden *Werkstoff* ab. Kupfer, Aluminium und Messing sowie Polymere wie PMMA und PC lassen sich ausgezeichnet und in bester Qualität mit Diamantwerkzeugen mikrostrukturieren. Deren Vorteile (hohe Standzeit, hohe Oberflächengüte und weitgehende Gratfreiheit der Strukturen) werden allerdings erkauft mit einer eingeschränkten Palette der bearbeitbaren Materialien; insbesondere betrifft dies den wichtigsten und beliebtesten Konstruktions- und Strukturwerkstoff: Stahl. Aufgrund der bei lokal hohen Schneidentemperaturen auftretenden Kohlenstoffdiffusion aus dem Diamant in den Stahl ist zur Bearbeitung von Stählen Diamant nur in Ausnahmefällen geeignet; hier muss auf Hartmetallwerkzeuge zurückgegriffen werden.

Bearbeitungsverfahren und Strukturen

Im Zusammenhang mit der Mikrobearbeitung soll nur auf Verfahren eingegangen werden, die eine präzise Kontrolle der Bahnbewegungen des Werkzeugs und bearbeitungsrelevanter Parameter wie Drehzahl, Vorschübe und Zustellungen erlauben. Vor allem bei komplexen Strukturen in der Fräsbearbeitung werden die Bahnbewegungen durch CAD/CAM-Tools generiert; diese Vorgehensweise entspricht der in der „Makrowelt“ gängigen Praxis. Im Folgenden sollen nur folgende spannende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden betrachtet werden: Bohren, Drehen, Fräsen und Hobeln/Stoßen/Räumen, wobei sich die Betrachtung an den realisierbaren Mikrostrukturen orientiert. Beim *Bohren* ist die erzielbare Strukturvielfalt am stärksten einge-

schränkt, und die Qualität einer Bohrung zeigt sich in der Rundheit, der Geradheit und der Wandrauheit. Es zeigte sich, dass tiefe Einzelbohrungen in die meisten gängigen Werkstoffe einzubringen sind, wenn auch die Standzeit des Bohrers nach wenigen Bohrungen erreicht sein kann. Selbst exotische Werkstoffe wie CaF_2 wurden bearbeitet; dazu war allerdings die Ermittlung spezieller Parameter nötig. Sofern es die Lochgeometrie zulässt, ist für hohe Präzisionsanforderungen (Abmessungen und Formtoleranzen besser als $5\ \mu\text{m}$) das Fräsen dem Bohren vorzuziehen; für konische Löcher oder speziell geformte Lochränder ist die Bearbeitung durch Fräsen unabdingbar. Weit aus variabler ist das *Drehen* rotationssymmetrischer Strukturen. Im IMVT wird es vorwiegend als Einstechdrehen zur Herstellung mikrostrukturierter Folienbänder für Apparate der Mikroverfahrenstechnik eingesetzt. Außerhalb des Forschungszentrums wird das Drehen in der Mikrotechnik bevorzugt im Ultrapräzisionsbereich als „Single Point Diamond Turning“ eingesetzt [1], mit denen in optischer Qualität gekrümmte Oberflächen herausgearbeitet werden können. In neueren Entwicklungen konnte gezeigt werden, dass auch die Stahlbearbeitung mit Diamant möglich ist, wenn das Werkzeug durch Ultraschall angeregt eine lineare oder elliptische Schwingung kleiner Amplitude ausführt [2]. Beim *Fräsen* werden Schaft- und Radiusfräser verwendet. Durch den Einsatz von 5-Achs-Bearbeitungszentren ist die größte Strukturvielfalt zu erzielen bis hin zu Freiformflächen und 5-Seiten Bearbeitung. Es zeigte

sich, dass beim Mikrofräsen mit den verfügbaren Maschinen ohne weiteres in den Mikrometerbereich vorgestoßen werden kann, sofern alle Randbedingungen von der Vorbereitung des Werkstücks und der Wahl der geeigneten Werkzeuge über eine geeignete Bearbeitungsstrategie und angepasste Bearbeitungsparameter bis zu gewissenhaften, fertigungsbegleitenden Kontrollen stimmen. Das Gros der Arbeiten betrifft das *Konturfräsen* ein- oder mehrstufiger ebener Strukturen, also beliebig geformte Zapfen oder Taschen, Stege oder Nuten. Die minimalen Taschen- oder Nutbreiten sind dabei durch den Fräserdurchmesser vorgegeben, ebenso die Innenradien von Taschenecken. Die minimalen Zapfendurchmesser und Stegbreiten liegen werkstoffabhängig zwischen $20\text{-}50\ \mu\text{m}$. Die erreichbaren Strukturhöhen sind zumeist begrenzt durch die Länge der eingesetzten Fräser. Auf der absoluten Skala reichen die realisierten Strukturhöhen von $20\ \mu\text{m}$ bis zu mehreren Millimetern. Mit Radiusfräsern können Freiformflächen ausgeführt werden. In mehreren Schrupp- und Schlichtschritten wird die gewünschte Struktur Schicht um Schicht aus dem Material herausgearbeitet. Anhand von Teststrukturen wurde nachgewiesen, dass Formfehler besser als $5\ \mu\text{m}$ ohne weiteres erreicht werden können. Profilwerkzeuge sind neben dem Drehen auch zum *Hobeln*, *Stoßen* und *Räumen* einzusetzen. Die Bedeutung dieser Verfahren mit linearer oder zirkularer Kinematik ist aber aufgrund der eingeschränkten Strukturvielfalt in der Mikrobearbeitung gering. Eine Weiterentwicklung stellt

das CNC-Hobeln dar. Abschließend ein Wort zur Gratbildung, die ein generelles Problem der spanenden Bearbeitung ist. Grate sind nicht nur aus optischen Gründen unerwünscht, sie können bei Abformwerkzeugen auch die Abformung, insbesondere bei der Entformung, erheblich erschweren. Die Bildung von Graten kann durch die Verwendung von Diamantwerkzeugen bei vielen Werkstoffen vermieden werden, oder die Grate werden in einem Nachbearbeitungsschritt mechanisch entfernt. Für den verzugsarm bis über 53 HRC härzbaren martensitischen Stahl (X2 NiCoMo 18 9 5) wurde ein Verfahren zur elektrochemischen Entgratung entwickelt, das keine nachteiligen Auswirkungen auf die Mikrostrukturen und Kantenverrundungen zeigt und zudem zu einer Glättung der Oberfläche führt: Mit Rauwerten um $200\ \text{nm}$ (R_a) und Kantenverrundungen von wenigen Mikrometern sind die gefertigten Mikrostrukturen aus gehärtetem Stahl bei deutlich größerer Verschleißfestigkeit in Abmessungen und Strukturqualität durchaus mit diamantgefrästen Strukturen aus Messing vergleichbar.

Neue Wege in der spanabhebenden Bearbeitung

Verfahrensentwicklungen eröffnen neue Möglichkeiten in der Strukturgestaltung. Beispiele für gemeinhin als spanabhebend nicht zugänglich betrachtete Strukturen sind gekrümmte Nuten mit Breiten kleiner als die verfügbaren Schaft- und Radiusfräserdurchmesser oder Taschen mit

scharfen Innenecken. Die Entwicklung des CNC-Hobelns bietet Lösungen für diese Probleme: Auf einem CNC-Bearbeitungszentrum werden Spindel und Fräser durch eine Vorrichtung ersetzt, mit der die Schneide eines Profilwerkzeugs um 360° gedreht werden kann. Zur Strukturierung wird dieses Werkzeug durch Bewegung der Tischachsen über das Werkstück geführt. Die Spanabnahme erfolgt wie beim Hobeln, sie ist allerdings nicht auf eine lineare Bewegung beschränkt; zur Bearbeitung gekrümmter Nuten wird die Werkzeugschneide in die aktuelle Schnittrichtung ausgerichtet [3]. Damit sind fast alle Bahnbewegungen wie beim Fräsen, mit der Besonderheit möglich, dass Nutenden und Tassenecken nicht wie durch ein rotierendes Werkzeug verrundet werden, sondern scharfkantig enden können (Abb. 2). Die mechanische Mikrobearbeitung ermöglicht die Fertigung von Prototypen für Machbarkeitsuntersuchungen, stellt aber vor allem mit der Bearbeitung von Formeinsätzen den Ausgangspunkt einer mikrotechnischen Massenfertigung von Abformteilen dar. Ein weiterer Nutzen ist die Kombination mit

anderen Mikrostrukturierungsverfahren, z.B. in der Bereitstellung gestufter Substrate für einen nachfolgenden LIGA-Prozess [4]. Die Kombination mechanischer Bearbeitung mit Laserschweißen wird durch ein neues CNC-Bearbeitungszentrum mit integriertem Schweißlaser neue Impulse erhalten: Auf dieser Anlage wird es möglich sein, 3D-Schweißnähte auszuführen, beispielsweise zur Montage von Apparaten für die Mikroverfahrenstechnik.

Mikrobearbeitung durch lasergestützte Verfahren

Strahlquellen – Materialien – Prozesse

Wesentliche Kenngrößen für ein durch Laserstrahlung zu strukturierendes Bauteil sind: Aspektverhältnis, Struktur- und Stegbreite, Oberflächenrauwerte und die Materialkennwerte wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Bindungsenergien bzw. -arten. Die Kenntnis dieser Daten ist erforderlich, bevor man für die Strukturierung eine passende Laserstrahlwellenlänge auswählen kann. Die Wellenlänge bestimmt

nämlich die Strukturauflösung und die Energieabsorption im Material. Pauschal kann man sagen: Je kleiner die Wellenlänge, desto kleiner die Strukturabmessungen. Für die Absorption im Material verhält es sich nicht so einfach. Dort gilt im Allgemeinen: Hohe Absorption im IR und im UV; kleine Absorption im Sichtbaren und NIR. Ein weiterer wichtiger Laserparameter ist die zeitliche Länge des Laserpulses. Man hat im gepulsten Laserbetrieb Laserpulsbreiten vom ms-Bereich bis hinunter in den fs-Bereich (10^{-15} s). Die Pulsbreite bestimmt den thermischen Eintrag der Laserstrahlung in das Material. Auch hier kann man vereinfacht feststellen: Je kürzer der Laserpuls, desto geringer ist die thermische Belastung des Materials. Ein weiterer wichtiger Laserparameter ist die Laserenergiedichte. Dieser Parameter bestimmt die Abtragate: Je höher die Energiedichte, desto höher die Abtragate. Nach Auswahl der Laserparameter wird der Anwender die dazu passende Bearbeitungsanlage auswählen. Die wichtigsten Verfahren für die Mikrobearbeitung sind das Laserstrahlschneiden, -schweißen, -bohren und der Formabtrag. Am

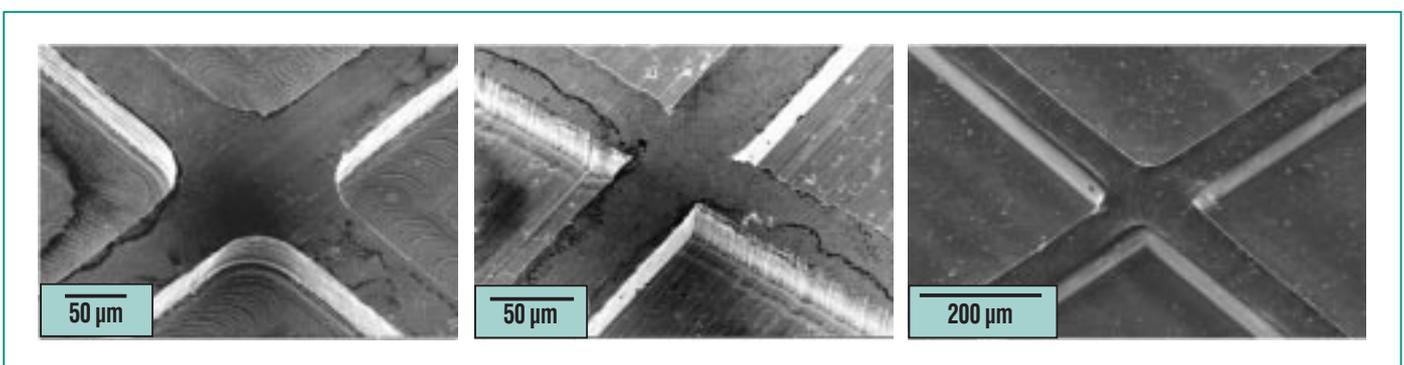


Abb. 2: Radien von Innenecken an Stegkreuzungen im Vergleich: (von links nach rechts) gefräst in Messing, gehobelt in Messing, gehobelt in Stahl und elektroliert.

IMF-I werden für die Strukturierungsaufgaben in der Mikro-technik unterschiedliche Laserstrahlquellen eingesetzt: CO₂-, Nd:YAG- und Excimer-Laser. Beim CO₂-Laser kann man bei den erzielbaren Strukturgrößen i.A. nicht mehr von Mikro-technik sprechen, dennoch kann er innerhalb der Mikrosystemtechnik zum großflächigen Bohren, Schweißen oder Schneiden von Kunststoffen eingesetzt werden. Mit Nd:YAG-Lasern (1064 nm, 532 nm) sind Strukturabmessungen von 10-30 µm und Abtragtie- fen im mm-Bereich möglich. Typi- scherweise werden Metalle und gesinterte Keramiken strukturiert. Den Nd:YAG-Laser kann man mit unterschiedlichen Wellenlängen betreiben: Man spricht dann von Frequenzverdopplung, -verdrei- fachung oder -vervierfachung. Verdreifachte und -vervierfachte Nd:YAG-Laser emittieren im UV- Bereich (355 nm, 266 nm) und eignen sich daher zur Strukturie- rung von nahezu allen Materialien (Polymere, Metalle, Keramiken). Bei der UV-Lasermaterialbearbei- tung von Polymeren oder organi- schen Materialien spricht man vom „kalten“ Materialabtrag, da der wesentliche Anteil der Laser- energie dazu genutzt wird, um di- rekt Bindungen im Material aufzu- brechen. Excimer-Laserstrahl- quellen emittieren auch im UV- Wellenlängenbereich (248 nm, 193 nm) und ermöglichen sehr hohe Strukturgenauigkeiten mit einer im Idealfall schädigungsfrei- en Strukturierung mit Abmessun- gen im Submikrometerbereich. Aktuell ist in der Forschung und Entwicklung zur lasergestützten Materialbearbeitung ein Trend zu fs-Lasersystemen (Laserpuls-

dauer 1-200 fs) und zu Excimer- Wellenlängen von 157 nm zu er- kennen [5,6]. Eine industrielle Nutzung dieser Systeme steht in den meisten Fällen jedoch noch aus, was unter anderem an erfor- derlichen Optikentwicklungen und an einer notwendigen deutli- chen Effizienzsteigerung liegt.

Mikroformabtrag von Polymeren und Stählen

Polymere

Der Formabtrag von Polymeren durch Laserstrahlung mit Struk- turgenauigkeiten im µm-Bereich erfolgt durch UV-Laserstrahlung. Die Excimer-Laserstrukturierung ermöglicht die Herstellung von dreidimensionalen Formen: Bei- spiele dazu sind sphärisch ge- krümmte Oberflächen, scharfkan- tige Kanalstrukturen oder Struktu- ren mit Hinterschneidungen. Hier- bei sind Strukturauflösungen von 1 µm möglich. Die erreichbaren Aspektverhältnisse sind material- und strukturabhängig. Für gut strukturierbare Polymere (z.B. PEEK, PC, PI, PSU) werden Aspektverhältnisse von 3 bis 10 erzielt. Die Abtragraten betragen für gut strukturierbare Polymere zwischen 0,5 und 1 µm/Puls. Das Polymer PI ist einer der besten Absorber für eine Laserwellenlän- ge von 248 nm. Für dieses Mate- rial zeigt sich bereits ab einer En- ergiedichte von 4 J/cm² eine für Polymere generelle Eigenschaft: Die Abtragrate als Funktion der Energiedichte weist für hohe En- ergiedichten eine Sättigung auf. Dieser Sättigungsbereich ist vor- teilhaft für die Lasermaterialbear- beitung, da Schwankungen in der Energiedichte, z.B. hervorgerufen durch lange Prozesszeiten oder

hohe Abtragtie- fen, keine Ände- rung in der Abtragrate bewirken. Außerdem erzielt man Ober- flächenrauwerte von 50-60 nm (R_a). Die frequenzvervierfachte Nd:YAG-Laserstrahlung eignet sich zu Herstellung kleinster Boh- rungen und Strukturen. Bei Puls- frequenzen von 1 kHz können zum Beispiel in 500 µm dicken PC Durchgangsbohrungen mit eini- gen µm Durchmesser im Sekun- dentakt erzeugt werden. Aber auch Stege mit Wanddicken von 2-3 µm und Höhen von 100 µm wurden bereits hergestellt, was aufgrund der kurzen Pulslängen (400 ps) und dem sich daraus er- gebenden geringen thermischen Eintrag in das Material möglich wird. Die Abtragrate für Excimer- Laserstrahlung beträgt ca. 10 µm/Sekunde bei maximalen lateralen Abmessungen von ca. 3 x 3 mm², während die Abtrag- rate von Nd:YAG-Laserstrahlung bei ca. 500 µm/Sekunde bei ei- ner lateralen Abmessung von ca. 0,05 x 0,05 mm² liegt. Eine großflächige Bearbeitung wird demnach mit Excimer-Laser- strahlung durchgeführt, während Strukturen mit mm-Abmessungen oder Bohrungen mit Nd:YAG-La- serstrahlung erzeugt werden. Ein wesentlicher Vorteil der Nd:YAG- Laserstrahlung liegt in der einfa- chen Übertragung von CAD/ CAM-Daten in den Fertigungs- prozess, während bei Excimer- Laserstrahlung aufgrund der klei- nen Laserrepetitionen auf Maskentechniken zurückgegrif- fen werden sollte. Der laserge- stützte Formabtrag von Polyme- ren wurde erstmals für die Ferti- gung von polymeren Formeinsät- zen entwickelt. Durch die enge Kooperation mit dem IMF-III

konnte dieses neue Konzept für die Abformung von Polymeren entwickelt und erfolgreich erprobt werden (Abb. 3). Als geeignetes Formeinsatzmaterial hat sich PI herausgestellt, das gegenüber dem verwendeten *Feedstock*-Material chemisch sehr stabil ist. Zudem werden in PI durch die Strukturierung mit UV-Laserstrahlung sehr hohe Oberflächenqualitäten ermöglicht. Bisher wurden mit PI-Formeinsätzen im UV-RIM und im Polymer-Mikrospritzguß bis zu 20 Formteile jeweils erfolgreich abgeformt. Es wird erwartet, dass polymere Formeinsätze wenigstens für eine Replikation von 50 Bauteilen geeignet sind. Somit steht für kleine Stückzahlen, so wie sie im Stadium der Bauteilentwicklung häufig anfallen, ein kostengünstiges und hochqualitatives Formeinsatzkonzept zur Verfügung. Zukünftige Untersuchungen werden im Hinblick auf Formeinsatzlebensdauer, Bauteilentwicklung und Einsatz von frequenzvervielfachter Nd:YAG-Laserstrahlung durchgeführt.

Stähle

Die lasergestützte Strukturierung von Stählen ist von hohem Interesse, um kostengünstige und verschleißbeständige metallische Formeinsätze für die Replikationstechniken zu entwickeln und um eine flexible Technologie für den 3D-Mikroformenbau bereitzustellen. Die Lasertechnologie ermöglicht Strukturdetails im Bereich von 20 µm und Aspektverhältnisse von 10. Im Allgemeinen sind hohe Abtragraten und hohe Oberflächenqualitäten nicht miteinander vereinbar. Bei lasergestützten Sublimationsprozessen treten bei hohen Abtragraten verstärkte Debrisbildung sowie Schmelzbildung auf, die wiederum zu erhöhten Rauwerten am Strukturierungsgrund sowie an den Seitenwänden führen [7]. Eine Abformung ist in diesem Fall dann nicht mehr ohne weiteres möglich. Es musste daher eine Prozesstechnik gefunden werden, die hohe Abtragraten mit hohen Oberflächenqualitäten vereinbaren kann. Für den Bereich

der CO₂-Lasermaterialbearbeitung ist das Laserspanen seit längerem bekannt [8]. Die Übertragung des Prozesses auf Nd:YAG-Laserstrahlung (Wellenlänge 1064 nm) im kontinuierlichen Betriebsmodus führte zu dem am Forschungszentrum entwickelten Lasermikrospanen für Stahlformeinsätze [9] mit dem für Mikrostrukturen sehr gute Oberflächenqualitäten erzielt werden ($R_z=1\ \mu\text{m}$, $R_a=200\ \text{nm}$). Die maximalen Abtragraten liegen bei $10^7\ \mu\text{m}^3/\text{s}$ und konnten somit innerhalb der letzten zwei Jahre um zwei Größenordnungen gesteigert werden. Durch Nachbearbeitung mittels Elektropolieren lassen sich die Oberflächen weiter verbessern, und Rauwerte von 100-200 nm (R_a) werden erzielt. Weiterführende Analysen in Bezug auf Abtragmechanismen und Reaktionsschichtbildung wurden durchgeführt [10]. Strukturen mit Aspektverhältnissen von bis zu 10 konnten erzielt werden und mittels UV-RIM in PMMA abgeformt werden. Kapillarelektropho-

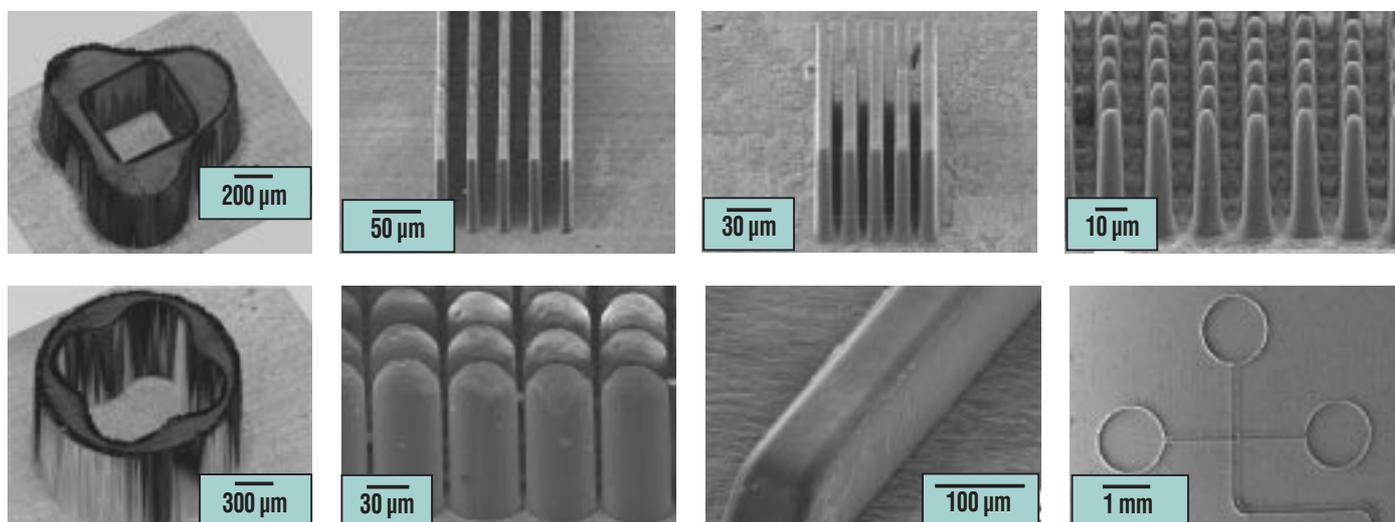


Abb. 3: PMMA-Abformungen, die mit laserstrukturierten PI-Formeinsätzen durchgeführt wurden (Abformtechnik: UV-RIM).

rese-Chips aus PMMA wurden abgeformt und hinsichtlich ihrer Funktionalität erfolgreich getestet [9]. Abb. 4 zeigt die einzelnen Schritte zur Fertigung von metallischen Formeinsätzen oder 3D-Formen. Zunächst wird im 3D-CAD eine 3D-Form entwickelt oder in das CAD-Modul importiert. Vom CAD-Modul wird die aufbereitete Form ins CAM-Modul übertragen. Dort wird das Modell in Schichten mit festgelegter oder individueller Dicke zerlegt. Jede einzelne Schicht wird mit einer geeigneten Füllstrategie belegt. Die für alle Schichten erzeugten NC-Daten werden dann auf die Lasermaschine für den Mikrospanprozess übertragen. Durch Replikationstechniken kann dann die Abformung des Formeinsatzes durchgeführt werden. Neben dem 3D-Formabtrag besteht in vielen Anwendungen der Bedarf an einer Fertigungs-

technologie zum Herstellen kleinster Bohrungen oder Sacklöcher mit hohem Aspektverhältnis (z.B. Entlüftungslöcher für Formeinsätze; gezielte Modifizierung tribologischer Oberflächen; Kalibrierungsnormale). Die „klassische“ Methode zur Fertigung kleinster Bohrungen verwendet Q-switch Nd:YAG-Laserstrahlung (Wellenlänge 1064 nm) mit Laserpulsbreiten von 100-200 ns. Mit dieser Strahlquelle lassen sich Löcher von 10-20 µm Durchmesser und hohem Aspektverhältnis (10-15) erzeugen. Eine weitere Verbesserung des Bohrergebnisses und eine weitere Verkleinerung des Bohrdurchmessers kann neuerdings durch Einsatz von frequenzvervierfacher Nd:YAG-Laserstrahlung mit kurzen Laserpulsbreiten von 400 ps ermöglicht werden. Lochdurchmesser betragen dann z.B. 5 µm bei einer Bohrlänge von 100 µm. Auf der

Laseraustrittsseite wird dann ein Durchmesser von ca. 2-3 µm erzielt. In 200 µm dickem Material wurden bereits Löcher mit 1 µm Durchmesser auf der Austrittsseite erzeugt. Erste Bohrungen mit frequenzvervierfacher Nd:YAG-Laserstrahlung zeigen sehr glatte Bohrwandungen, was bereits bei der Fertigung von Entlüftungslöchern (Durchmesser 20 µm) in metallischen Formeinsätzen in Industrieanfragen erfolgreich eingesetzt wurde.

Schweißen von Stahl und Aluminium

Die Prozessparameter zum Laserschweißen dünner vorstrukturierten Edelstahlfolien wurden erfolgreich optimiert und für Mikrostrukturapparate angewendet. Neben heißrissgefährdeten Legierungen stellt Aluminium im Vergleich zu Edelstahl an Schweißverfahren jedoch besondere Anforderungen: Die hohe Wärmeleitfähigkeit bewirkt vergleichsweise hohe Leistungsverluste durch Wärmeleitung in das Umgebungsmaterial. Andererseits weist Aluminium eine hochschmelzende Oxid-Deckschicht auf, die für den Schweißprozess aufgebrochen oder zuvor entfernt werden sollte. Die Aluminiumschmelze neigt erheblich zu Oxidation mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft. Die Festigkeit der Schweißnaht wird insbesondere beim Mikroschweißen durch die Oxidation der Schmelze bestimmt. Daher muss für die Reproduzierbarkeit des Fügeverfahrens sowohl die Reinheit des Schutzgases als auch die Anordnung der Prozessgasdüsen besonders beachtet werden. Der

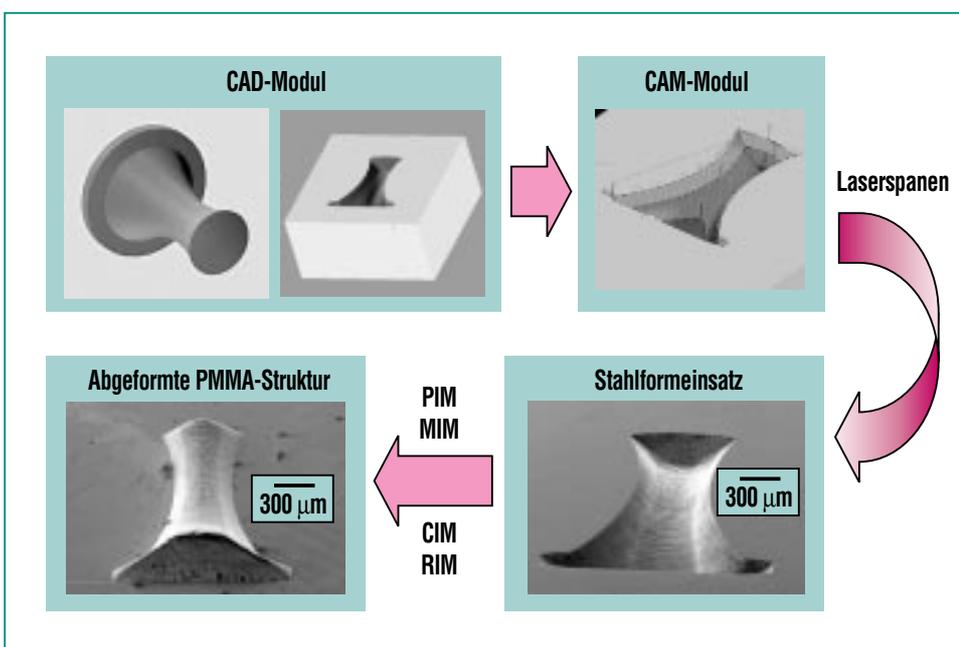


Abb. 4: Vom 3D-Modell zur 3D-Struktur für Anwendungen im 3D-Formenbau oder für Formeinsätze (Material: Stahl X16CrNiSi25-20).

Schweißprozess wird von der Pulsfrequenz, Laserpulsbreite und Schweißgeschwindigkeit bestimmt. Die zukünftigen Verfahrensentwicklungen zum Mikrofügen werden getragen durch die Einführung neuer Methoden der zeitlichen und räumlichen Laserpulsformung. Durch die Erweiterung der Laserprozesstechnik mit einem neuen technologischen Ansatz, dem sogenannten *pulse-shaping*, wird es möglich, die Einzelpulse gezielt zeitlich zu formen, um so eine optimierte Laserstrahleinkopplung für hochreflektierende oder heißrissgefährdeter Werkstoffe mit deutlicher Verbesserung der Schweißnahtqualitäten zu erhalten.

Mikrosystemtechnische Zusammenhänge

Auf dem weltweiten Forschungsmarkt wetteifern Institute und Forschungseinrichtungen um kleinste Strukturen und andere technologische Höchstleistungen, und von den Leistungen der Industrieforschung erfährt man regelmäßig über die Einführung neuer Produkte. Das Forschungszentrum Karlsruhe ist mit seinen Mi-

krofertigungstechniken in dieser Forschungslandschaft gut positioniert, kann aber als Großforschungseinrichtung deutlich mehr erreichen, wenn es seine Arbeiten konsequent interdisziplinär und institutsübergreifend ausrichtet. Das Beispiel des Industrieforums FIF zeigt, dass diese Art der Zusammenarbeit seitens der Industrie als Mehrwert erkannt und das Forschungszentrum als kompetenter Technologie-Anbieter und Kooperationspartner geschätzt werden. Innerhalb der angebotenen Mikrofertigungstechniken erfahren die Zerspanung und die Laserbearbeitung eine besonders starke Nachfrage, wohl aufgrund ihrer bestehenden Nutzung in etablierten Produktionsprozessen. Im Folgenden werden exemplarisch einige Produkte der Mikrosystemtechnik vorgestellt, die mit den Fertigungstechnologien Mikrozerspanung und Laserbearbeitung gestaltet oder mitgestaltet wurden. Deutlich erkennbar wird der Trend der Einbindung dieser Technologien in Prozessketten der Mikrosystemtechnik, um speziell bei komplexen Funktionsstrukturen erfolgreich zu sein.

Mikroverfahrenstechnik

Bei der Herstellung von metallischen Mikrostrukturapparaten (Mikrowärmeübertrager, Mikrovermischer, Mikroreaktoren) besteht ein deutlicher Bedarf an einer lasergestützten Verbindungstechnik für Aluminiumfolien und hochlegierte Stahlfolien. Die Prozessentwicklung am IMF-I bedeutet zum Fügen von Mikroreaktoren eine Übertragung des Laserschweiß-Verfahrens in die Mikrotechnik. Die Anwendungen in der Mikroverfahrenstechnik erfordern die Entwicklung des Laser-Mikroschweißens mit folgenden Zielen: Reduzierung der Prozessporen und der Heißrissbildung, Erzeugung einer gasdichten Schweißverbindung, Erzeugung möglichst hoher Schweißnahttiefen bei gleichzeitig schmalen Nahtbreiten von 100-200 µm, Erzeugung von Schweißnähten mit hoher Festigkeit und Auswahl geeigneter Legierungen. Das Mikroschweißen von Stahlfolien ermöglicht derzeit vakuumdichte Verbindungen mit einer He-Leckrate von $9 \cdot 10^{-10}$ mbar-l/s. Die Funktion der zuvor mechanisch eingebrachten Kanalstrukturen wird nicht beeinträchtigt (Abb. 5).

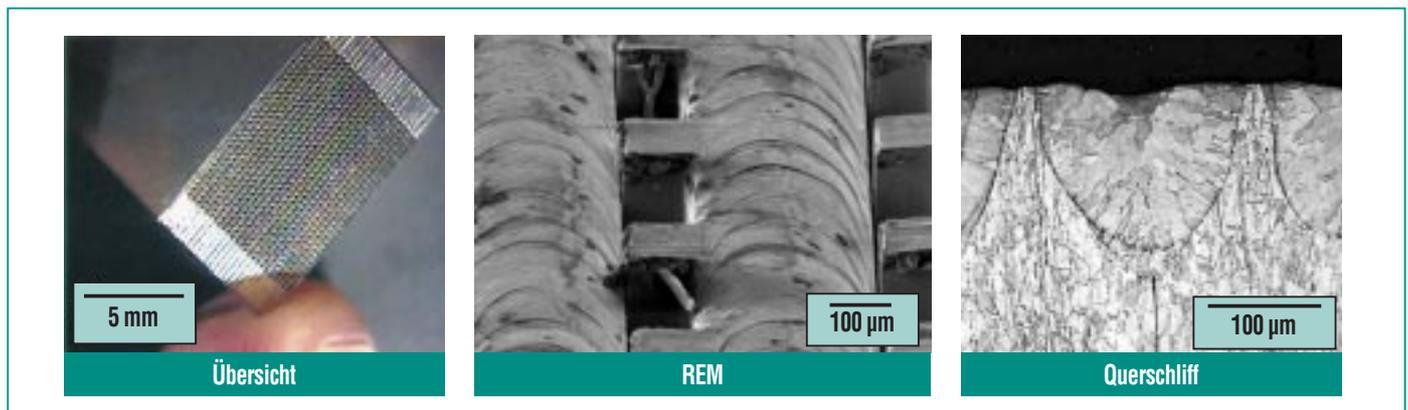


Abb. 5: Laserstrahlschweißen von Mikrowärmeübertragern aus Stahl (Abmessung 14 x 14 mm²).

Zusätzlich wurde das Lasermikrobohren von vorstrukturierten Metallfolien mit minimalen Lochdurchmessern von 10-20 μm durchgeführt, um Zumschöffnungen für Mikroreaktoren zu realisieren.

Life Sciences

Prototypen für Kapillar-Elektrophorese-Chips wurden durch direkte Laserstrukturierung von Kunststoffen ermöglicht [11] und auch für Industriepartner gefertigt. Bei Abtragraten von bis zu 1 μm /Laserpuls und typischen Laserpulsfrequenzen von 5-100 Hz (Excimer) bzw. 100-2000 Hz (Nd:YAG) können Kanalstrukturen durch scannenden Abtrag

hergestellt werden. Die Excimer-Laserstrahlung kann durch komplexe Maskengeometrien bzw. variable motorisierte Masken über Makro- bzw. Mikroprojektionsoptiken großflächig auf die Kunststoffoberfläche abgebildet werden. Durch die Verwendung motorisierter Masken werden auch für die Kanallengpunkte scharfe Kanten erzielt. Die Kanalbreiten können in einem Bereich von 1-300 μm kontinuierlich eingestellt werden. Für die Serienfertigung von Kapillar-Elektrophorese-Chips mittels Replikationstechniken wurden Stahlformmeinsätze durch mikromechanisches Fräsen [12] und Lasermikrospanen im Industrieauftrag gefertigt. Die Prozesszeit für das La-

sermikrospanen des gesamten Formeinsatzes in Abb. 6 beträgt derzeit noch vier Stunden bei einer Abtragtiefe von 150 μm , bei der mechanischen Bearbeitung großflächiger Formeinsätze können die Bearbeitungszeiten sogar um den Faktor 10 größer sein.

Tissue Engineering

Die Fertigung von Flachbettreaktoren für das Tissue Engineering ist ein Beispiel für erfolgreiche Synergieeffekte der Fertigungstechnologien am Forschungszentrum (Zusammenarbeit von IMB, IMF-I, IMF-III und IMVT). Die Prozesskette beinhaltet die Fertigung von metallischen Formeinsätzen durch Mikrofräsen, die Abformung

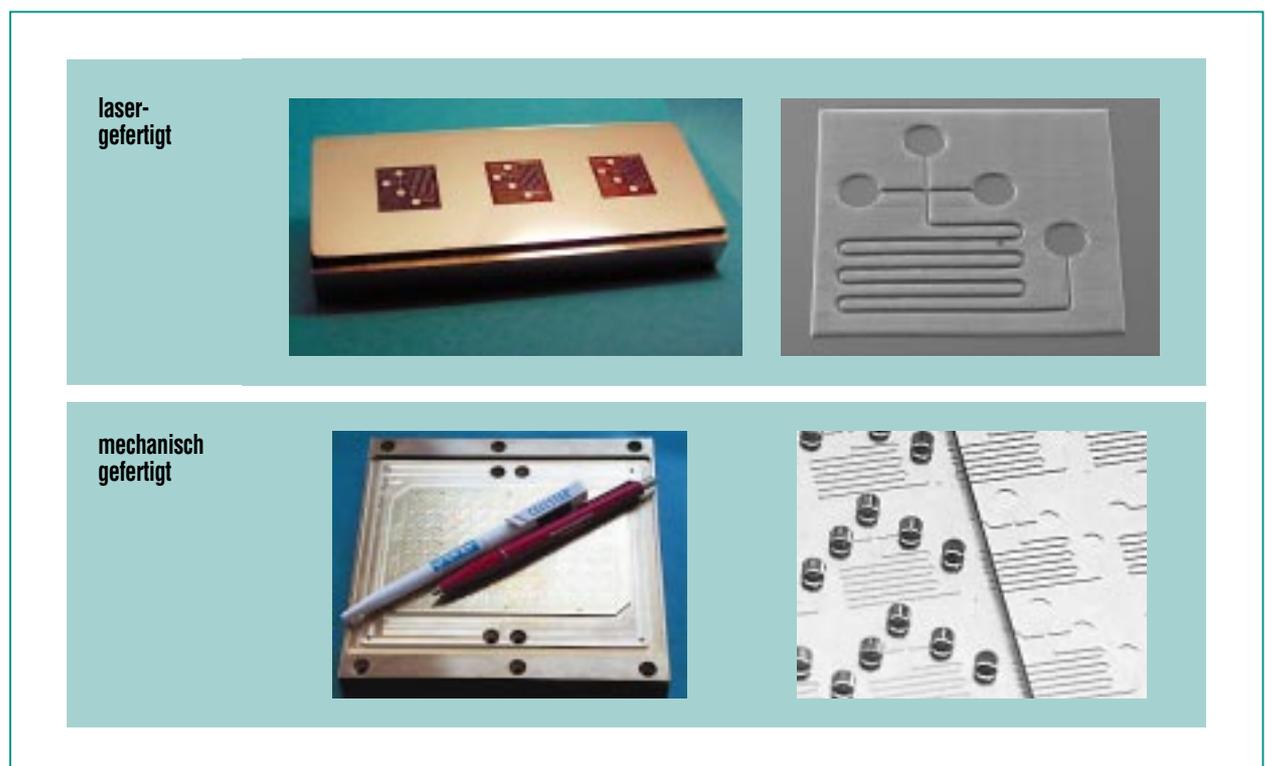


Abb. 6: Oben: Laserstrukturierter Stahlformmeinsatz mit CE-Chip-Struktur (links) und mit Heißprägen abgeformte Struktur in PMMA (rechts). Unten: Mechanisch gearbeiteter Formeinsatz für einen Kapillar-Elektrophorese-Chip im Mikrotiterplattenformat (links) und eine Abformung davon (teilweise gedeckelt, rechts). Das Design ist von der Greiner Bio-One GmbH.

von Komponenten aus Polycarbonat durch Mikrospritzgießen und das Laserstrahlbohren mit Excimer-Laserstrahlung. Die Flachbettreaktoren werden als Träger für dreidimensionale Zellkulturen verwendet [13]. Mit Hilfe der Excimer-Laserstrahlung werden Löcher mit einem Durchmesser von ca. 2-2,5 µm und einer Bohrlänge bis 100 µm in den Boden der spritzgegossenen Flachbettreaktoren eingebracht. Die Bohrungen dienen als Kanäle für die Nährstoffzufuhr zu den Zellkulturen. Die Lochdurchmesser müssen kleiner als 3 µm sein, um ein Zuwachsen durch die Zellen zu vermeiden. Die Strukturierung durch Excimer-Laserstrahlung ermöglicht die Herstellung von mehr als 10⁴ Löchern pro Minute [14].

Zusammenfassung

Es wurden neue Prozesstechniken und Trends im Bereich der direkten Strukturierung von Prototypen und für die Formeinsatzfertigung vorgestellt im Hinblick auf die einmalige Verbundsituation der vorhandenen Fertigungstechnologien. Im Forschungszentrum Karlsruhe werden bei der Mikrosystementwicklung Synergieeffekte

zwischen den unterschiedlichen Fertigungstechnologien genutzt, wenn es um die Entwicklung komplexer Produkte für die Mikrosystemtechnik geht. Es werden metallische oder polymere Formeinsätze entwickelt, die durch Reaktionsgießen, Heißprägen oder Spritzgießen abgeformt werden können. Ebenso besteht eine enge Kooperation zwischen der Lasermaterialbearbeitung und der mikromechanischen Fertigung, wenn es um die Auswahl der geeigneteren Strukturierungstechnologie oder sogar um die Kombination beider Technologien geht. Die Stärke der Lasertechnologie ist hierbei die Einbringung von kleinsten Strukturen oder Bohrungen in Metalle mit Abmessungen zwischen 2-50 µm, die qualitativ hochwertige µm-Strukturierung von Kunststoffen und die gezielte Erzeugung von schmalen Fügeverbindungen in Metallen oder Polymeren. Die Stärken der spanenden Bearbeitung liegen in der hohen Oberflächenqualität und der enormen Strukturvielfalt bei der Fertigung von Prototypen und großflächigen Abformwerkzeugen mit Strukturabmessungen von 20 µm bis in den Millimeterbereich.

Danksagung

Wir danken den Kollegen vom IMB, IMF-I, IMF-II, IMT, IMVT, ZWM und FIF sowie den Industriepartnern für die Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt M. Torge, W. Bernauer und H. Besser für die engagierte Durchführung und Auswertung der Lasermaterialbearbeitung sowie zahlreicher Diskussionsbeiträge; die mechanische Bearbeitung wäre nicht möglich ohne Rat und Tat von L. Eichhorn, D. Scherhauser, F. Messerschmidt und T. Wunsch.

Literatur

- [1] E. Brinksmeier, W. Preuss, *Proceedings ASPE 1999 Spring Topical Meeting, Vol. 19 (1999) 9*
- [2] F. Klocke, W. Rübenach, *Industrie Diamanten Rundschau 34 2 (2000) 133-146*
- [3] T. Schaller, K. Schubert, *Proceedings ASPE 16th Annual Meeting, Crystal City, USA, Vol. 25 (2001) 469*
- [4] U. Wallrabe, H. Dittrich, G. Friedsam, T. Hanemann, J. Mohr, K. Müller, V. Piotter, P. Ruther, T. Schaller, W. Zißler, *RibCon®, HARMST'01, Baden-Baden, Book of Abstracts (2001) 231*
- [5] S. Nolte, G. Kamlage, F. Korte, T. Bauer, T. Wagner, A. Ostendorf, C. Fallnich, H. Welling, *Advanced Engineering Material 2 (2000) 23*
- [6] H. K. Tönshoff, F. von Alvensleben, M. Rinke, K. Körber, C. Kulik, *Proceedings MicroEngineering 1999, Stuttgart 29.09.99-01.10.99 (1999) 176*
- [7] A. Gillner, *Laser Micro Machining, Proceedings of the International Seminar on Precision Engineering and Micro Technology, euspen (2000) 105*

-
-
- [8] G. Eberl, P. Hildebrand, M- Kuhl, U. Sutor,
Laser und Optoelektronik 25(3) (1993) 80
- [9] W. Pfleging, T. Hanemann, W. Bernauer, M. Torge,
Proc. of SPIE Vol. 4274 (2001) 331
- [10] W. Pfleging, A. Meier, T. Hanemann, H. Gruhn, K.-H. Zum Gahr,
Mat. Res. Soc. Symp. 617 (2000) J5.5.1
- [11] M. Torge, W. Pfleging,
4th Internat. Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology HARMST'01, Baden-Baden, Book of Abstracts (2001) 107
- [12] A. Guber, A. Gerlach, M. Hecke, D. Herrmann, G. Knebel, A. Muslija, T. Schaller,
IMRET 5, May 27-30, 2001, Strasbourg (2001)
- [13] G. Knedlitschek, F. Schneider, E. Gottwald, T. Schaller, E. Eschbach, K. F. Weibezahn,
Journal of Biomechanical Engineering 121 (1999) 35
- [14] W. Pfleging,
LaserOpto, 31(5) (1999) 54-57