

# Großflächige ultraschnelle Mikrobearbeitung mit multiplen Laserspots

Stephan Brüning<sup>a</sup>, Keming Du<sup>b</sup>, Arnold Gillner<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Schepers GmbH & Co. KG, Karl Benz Str. 7, 48691 Vreden

<sup>b</sup> Edgewave GmbH, Carlo-Schmid Str. 19, 52146 Würselen

<sup>c</sup> Fraunhofer ILT, Steinbach Str. 15, 52074 Aachen

*Ultrakurzpuls-Laser haben sich in den vergangenen Jahren weit verbreitet, um hochpräzise Mikrostrukturen direkt in nahezu jedem Material zu realisieren. Trotz der derzeitigen Verfügbarkeit von UKP-Hochleistungslasern (bis zu mehreren hundert Watt) ist es immer noch eine Herausforderung, große Flächen, wie sie für Prägezyylinder für Rolle-zu-Rolle Anwendungen benötigt werden, in einer für die industrielle Produktion akzeptablen Bearbeitungszeit zu strukturieren. In diesem Beitrag wurde ein hochkompakter ps-Laser mit Repetitionsraten von bis zu 8 MHz und einer mittleren Leistung von 500 W durch ein diffraktives optisches Element (DOE) auf 16 parallele Strahlen verteilt. Die Leistung wurde durch einen akusto-optischen Modulator pro Strahl moduliert. Integriert in ein ultrahochpräzises Zylindergravursystem wurden die 16 Spots mit einer Genauigkeit von  $< 1 \mu\text{m}$  synchronisiert. Auf der Zylinderoberfläche wurden in einem Spot-zu-Spot Abstand von  $20 \mu\text{m}$  Einzelspotdurchmesser von  $13 \mu\text{m}$  erreicht. Verschiedene funktionale Mikrostrukturen wurden als Master realisiert.*

## 1. Aktueller Stand

### 1.1 Rolle-zu-Rolle Fertigung

Oberflächenfunktionalisierte Kunststofffolien und Papierbahnen durch Rolle-zu-Rolle (R2R)-Bearbeitung oder auch Bleche mit Dicken bis zu 2 mm durch Rolle-zu-Platte (R2P)-Bearbeitung, sind für eine Vielzahl von Produkten von großem Interesse. Die direkte Strukturierung dieser Substrate mit Strukturturen von z. B.  $200 \mu\text{m}$  bleibt aufgrund einer unzureichenden Durchsatzrate durch direkte Laserbearbeitung von  $1 \text{ m}^2/\text{h}$  bei Kunststofffolien (mit cw-Yb-Faserlaser oder CO<sub>2</sub>-Laser) bzw.  $1 \text{ m}^2$  in 10 Tagen bei Stahl (mit ps-Laser) um Dekaden hinter dem industriellen Bedarf zurück. Auf eine Vielzahl von Substraten können jedoch Mikrostrukturen durch einen R2R/R2P-Prägeprozess übertragen werden (Abb. 1). Die Verformung durch ein Werkzeug in einem Massenproduktionsprozess mit hohen Durchsatzraten von bis zu  $250 \text{ m}^2/\text{min}$  bei Papier, etwa  $10 \text{ m}^2/\text{min}$  bei Kunststoffen oder  $4 \text{ m}^2/\text{min}$  bei Aluminiumblech sorgt für die geforderte Vervielfältigungsgeschwindigkeit. Alternativ werden in jüngerer Zeit R2R-UV-Nanoimprinting-Verfahren für noch höhere Auflösungen (z. B. holografische Strukturen) für großflächige Oberflächen bei Durchsatzraten von  $10 \text{ m}^2/\text{min}$  eingesetzt [1].

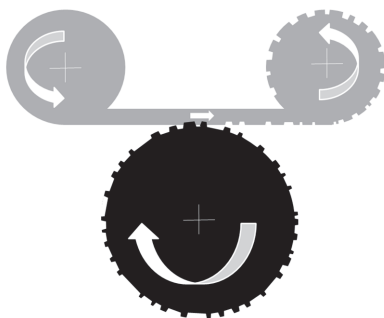


Abb. 1 Schematische Darstellung eines Rolle-zu-Rolle Prägeprozesses

### 1.2 Zylinder-Präge-Werkzeuge

Ultrakurzpuls-Laser bieten aufgrund der extrem kurzen Pulse und der hohen Pulsenergie einen materialunabhängigen, nahezu schmelzfreien Abtrag mit hervorragender Qualität. Ein systembedingter Nachteil ist jedoch die sehr geringe Produktivität im Vergleich zu ns-Laserpulsen. Um eine hohe Produktivität zu erreichen, sind einerseits hohe Pulswiederholraten notwendig, andererseits ist eine Skalierung der Anzahl abtragender Spots unumgänglich. Eine Anwendung, bei der systematisch hohe Scangeschwindigkeiten erreicht werden können, ist die Gravur von Präge- und Druckzylindern. Da das Werkstück in diesem Fall rotationssymmetrisch ist (Abb. 2), kann eine sehr hohe gleichmäßige Umfangsgeschwindigkeit erreicht werden. Ein frei modulierbarer Laserspot ermöglicht die Übertragung von dreidimensionalen Strukturen auf die Zylinderoberfläche. Bei Auflösungen von 5080 dpi (Pixelgröße  $5 \mu\text{m}$ ) und 44 W Laserleistung sind in einem Zylindergravursystem Oberflächengeschwindigkeiten von  $10 \text{ m/s}$  in  $4 \text{ mm}^3/\text{min}$  für Stahl möglich. Diese Geschwindigkeiten können durch vier Strahlquellen auf ca.  $16 \text{ mm}^3/\text{min}$  gesteigert werden, was für eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  mit einer Tiefe von  $220 \mu\text{m}$  in Stahl immer noch eine Prozesszeit von 10 Tagen bedeutet [2]. Im BMBF-Projekt MULTISURF wurde eine weitere Prozessbeschleunigung durch Erhöhung der Anzahl der Laserspots verfolgt. Ziel des Projektes war es, die leistungsstarken USP-Laserquellen von einigen 100 W auf bis zu 100 einzeln modulierte Spots zu verteilen und damit die Prozesszeiten zu verkürzen (Abb. 3). In diesem Beitrag werden die Anwendung der zylindrischen Mikrostrukturierung, die Erzeugung und Modulation vieler einzelner parallel abtragender Spots auf dem Zylinder und einige repräsentative Anwendungen vorgestellt.

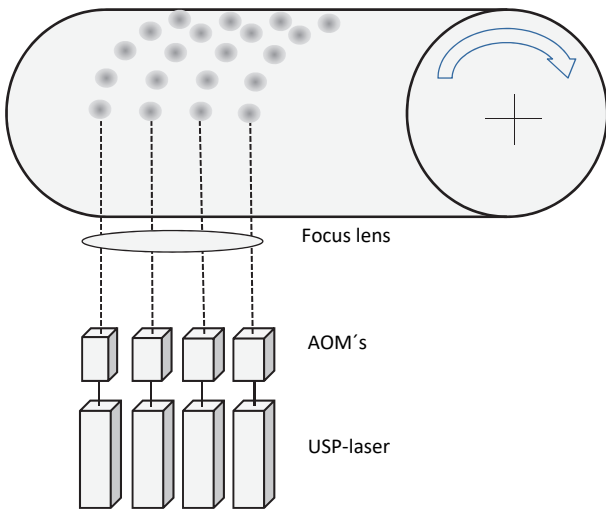


Abb. 2 Schema Multi-Laser / Multi-Beam

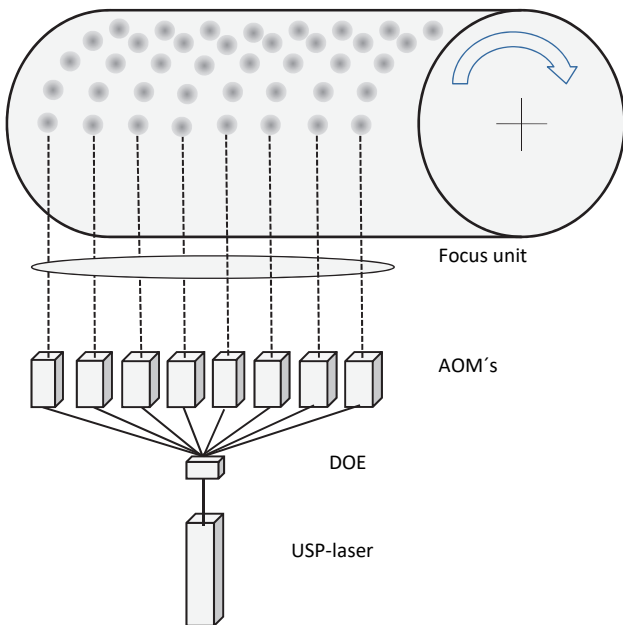


Abb. 3 Schema Single Laser / Multi-Beam

## 2. Ultrapräzises Zylinder-Mikrobearbeitungssystem

Durch die gleichmäßige Rotation eines Zylinders mit Geschwindigkeiten von bis zu 4000 U/min sind in einem Zylinderbearbeitungssystem, wie dem in Abb. 4 gezeigten DIGILAS-System, Oberflächengeschwindigkeiten von 50 m/s und damit konzeptionell eine sehr schnelle Oberflächenstrukturierung möglich [3]. In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte hinsichtlich einer deutlichen Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit erzielt. So wurden im Bereich der Zylinderachse die kugelgelagerten Reitstöcke durch hydrostatische Reitstöcke ersetzt. Alle Achsen werden durch Direktantriebe gesteuert. Es konnte so eine axiale und radiale Genauigkeit von  $< 1 \mu\text{m}$  erreicht werden, selbst bei Drehgeschwindigkeiten von bis zu 4000 RPM. Die Strahlführung kann aktiv mit einer Genauigkeit von  $\pm 200 \text{ nm}$  bei einer Gravurbreite von

5m positioniert werden. Bei einer temperatur-stabilisierter Lage ist eine Präzision von ca.  $1 \mu\text{m}$  möglich. Somit ist neben einem schnellen Bearbeitungssystem auch ein 3D- $\mu\text{m}$ -Strukturierungsprozess mit einer sub- $\mu\text{m}$ -Präzision von Bauteilen mit einer Größe von einigen  $\text{m}^2$  möglich.

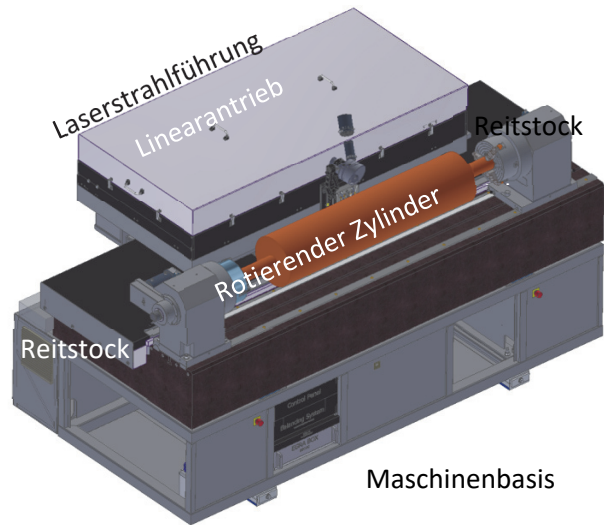


Abb. 4 Ultra präzises Zylinderbearbeitungssystem

### 2.1 Datenvorbereitung

Die Erzeugung von 3D-Strukturen mit Tiefen von mehreren  $100 \mu\text{m}$  in einem Arbeitsgang (eine Schicht) ist in Metallen nicht möglich, da aufgrund der geringen thermischen Eindringtiefe ultrakurzer Pulse die resultierende Materialabtragtiefe pro Schicht selbst bei mehrfacher Pulsüberlappung von Spot zu Spot bis zu  $1 \mu\text{m}$  (mehrere  $100 \text{ nm}$  pro Puls) beträgt. Eine Tiefe von mehreren  $10 \mu\text{m}$ , die für Prägeelemente, wie z. B. die Lederstruktur (Abb. 5) notwendig ist, kann daher nur durch mehrere Gravurschichten erreicht werden.

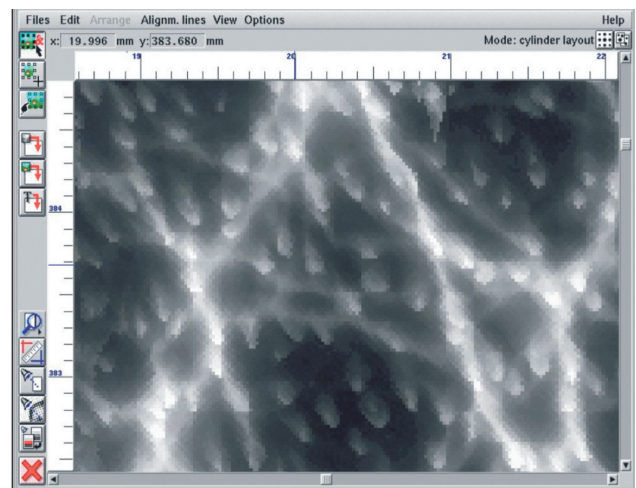


Abb. 5 3D-Lederstruktur, Auflösung: 1270 DPI, Vergrößerung: 5x

Generell erfolgt der Prozess nach einem Imagesetter-Prinzip, d.h. der Laser wird pixelweise über einen Bitmap-Datenbestand gesteuert (Abb. 6).

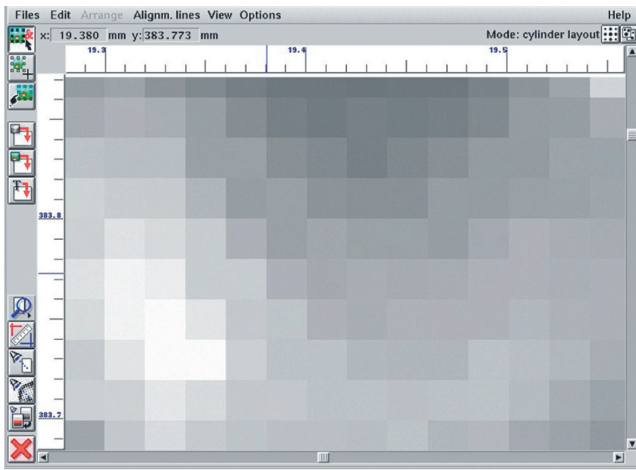


Abb. 6 Detailansicht von Abb. 5, Vergrößerung: 50x, Pixel-Größe: 20  $\mu\text{m}$

Das in 8-Bit Pixeln aufgelöste Bild, wird in 1-Bit-Dateien unterteilt, die wiederum die einzelnen Schichten repräsentieren. Ein 8-Bit-Datensatz setzt sich somit, je nach gewünschter Strukturtiefe, aus maximal 255 1-Bit-Datensätzen zusammen (Abb. 7).

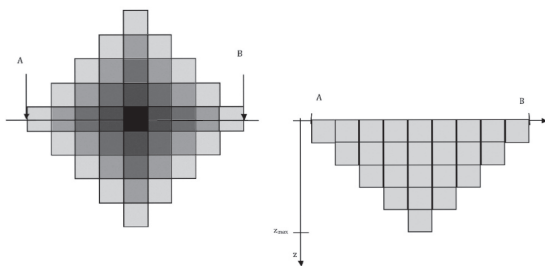


Abb. 7 Links: 8-bit Datensatz, Rechts: Querschnitt-Tiefeninformation

Unter Berücksichtigung der Fläche von 1m x 1m überschreitet eine Datei mit einer Auflösung von 5  $\mu\text{m}$  pro Pixel die 4GB-Grenze in Windows basierten Systemen, selbst bei einer 1bit-Datei. Um diese Grenze zu umgehen, werden im DIGILAS System „Big-tif“ Formate verwendet. Zusätzlich wird die Schrittweite der Schichten durch den Materialabtrag pro Schicht definiert, was wiederum die Tiefenaufklärung bestimmt. Die Gravurdaten werden so aufbereitet, dass ein Rasterwert einer bestimmten Tiefe und damit einer definierten Anzahl von Ebenen zugeordnet wird, wie in Abb. 7 beschrieben. Der Materialabtrag pro Schicht ist umgekehrt proportional zur möglichen Tiefenaufklärung und ist abhängig vom zu strukturierenden Metall. Während des Graviervorgangs verfolgt die Steuerungssoftware die Fokusslage von Schicht zu Schicht. Insbesondere bei tieferen Strukturierungen (mehrere 10  $\mu\text{m}$ ) muss die Fokusslage nachgeführt werden, um sie im Bereich der Tiefenschärfe zu halten und damit konstante Materialabtragbedingungen zu gewährleisten. Das typische schichtbasierte Mikrobearbeitungsverfahren wurde zu einer Bearbeitungstechnik weiterentwickelt, bei der mehrere Schichten innerhalb eines Überlaufs bearbeitet werden können. Mit dem 8-Bit-Datensatz steuert ein Modulator pro Kanal individuell die Fluenz jedes Spots von Pixel zu Pixel.

### 3. Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laser

Zur Leistungs- und Energieskalierung des Lasersystems wurde ein Oszillator- und Verstärkersystem (MOPA) nach dem INNOSLAB-System verwendet [4]. Der Hochleistungs-Slab-Laser enthält einen Nd:YVO4-Mode-Locked-Oszillator mit einer Pulsfolgefrequenz von 50 MHz, und einer Einzelpulslänge von 10 ps bei einer mittleren Leistung von 1,7 W. Der Pulspicker koppelt, gemäß der gewünschten Frequenz, in den Verstärker ein. Der Strahlqualitätsfaktor beträgt  $M^2=1,3$ . Abb. 8 zeigt den schematischen Aufbau des Slab-Verstärkersystems.

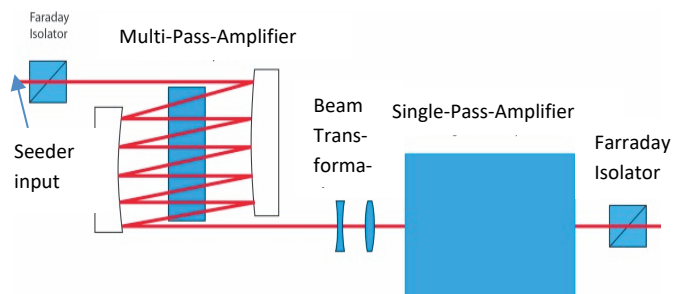


Abb. 8 Schematische Darstellung des Slab-Verstärkersystems

Der Slab-Verstärker ist in zwei Stufen aufgeteilt. Für die erste Stufe wurde ein Mehrpass-Slab-Verstärker und für die zweite Stufe ein Single-Pass-Verstärker verwendet. Die Ausgangsleistung der ersten Stufe beträgt 300 W und nach dem zweiten Verstärker wird eine mittlere Leistung von 500 W mit einem Gaußschen Strahlprofil mit  $M^2 < 1,3$  (Abb. 9) gezeigt, erreicht.

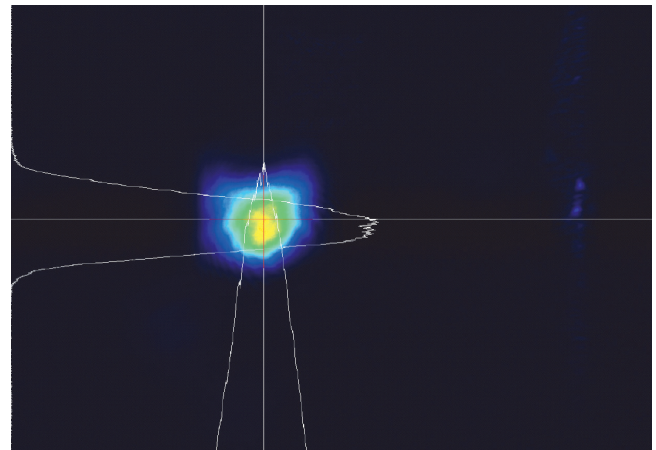


Abb. 9 Stahlprofil 500 W Laser,  $M^2_x=1.16$ ,  $M^2_y=1.06$

### 4. Multi Spot Strahlführung

Ein Ansatz zur Reduzierung der Bearbeitungszeit ist die Skalierung der Anzahl der Laserquellen, die parallel und gleichzeitig das Werkstück bearbeiten (Abb. 2). Ein optischer Aufbau mit nur einem Bearbeitungsobjektiv ermöglicht einen kompakten Bearbeitungskopf. Die hohe Kompaktheit begrenzt jedoch die maximale Anzahl der kombinierbaren Laser. Bei einer Zusammenführung von vier Lasern und vier Abtragsspots mit einem Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  und einer durchschnittlichen Gesamtleistung von 176 W (4 x 44 W @ 1 MHz jedes Lasers) ergibt sich bei Kupfer eine maximale Abtragrates von

22 mm<sup>3</sup>/min [2]. Wenn kleinere Spotgrößen (5 - 15µm) für hochauflösende Anwendungen gewünscht sind, kann die verfügbare Pulsenergie einer einzelnen Laserquelle mehrere Laserspots bedienen, um die Fluenz nahe am Optimum zu halten. Die Aufspaltung eines einzelnen Hochleistungslaserstrahls in eine definierte Anzahl von Spots durch ein diffraktives optisches Element (DOE) und einen Pulspicker bietet die Möglichkeit eines kompakten Bearbeitungssystem.

#### 4.1 Effiziente diffraktive Strahlteiler

Untersuchungen an strahlteilenden Komponenten zeigen, dass diffraktive optische Elemente (DOE) teilweise weniger effizient sind als refraktive, Polarisations- oder Dünnschicht-Strahlteiler [8]. Ein Aspekt von DOEs ist die typische Realisierung als diskrete binäre oder mehrstufige Komponente. Ein alternativer Weg ist die direkte Übertragung der kontinuierlichen Phasenfunktion. In diesem Projekt wurde eine kontinuierliche diffraktive Struktur auf Quarzglas für die Strahlteilung verwendet [8].

Allerdings ist die Erzeugung einer geraden Anzahl von gleichmäßig verteilten Spots schwierig und die Ergebnisse sind oft von einer starken Nullbeugungsordnung überlagert. Aus diesen Gründen und der Beschränkung auf einen achtkanaligen AOD wurde ein neunkanaliger, geradzahliges Strahlteilerentwurf realisiert.

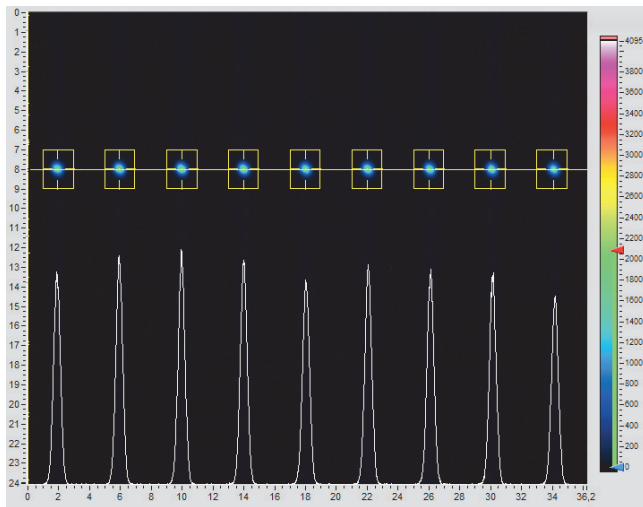


Abb. 10 Optische Messung eines DOE. Es wurde ein Kontrast von 4,9% gemessen

Da die Anzahl der Beugungsordnungen des Strahlteilers und des akusto-optischen Deflektors nicht übereinstimmen, wird eine der neun Beugungsordnungen ausgekoppelt und als Leistungsreferenz verwendet. Für den Fall, dass der 4%ige Spitze-Spitze-Kontrast für die Anwendung zu hoch ist, könnte die Feinjustierung der einzelnen Strahlen durch Modifikation des akustischen Feldes erreicht werden, indem die Beugungseffizienz des Bragg-Gitters des AOD angepasst wird. Abb. 10 zeigt das vorgesehene Strahlteiler-Profil und die simulierte Fernfeld-Intensitätsverteilung. In der Anwendung bietet dieser optische Aufbau eine Erhöhung der Abtragraten in

gleicher Weise wie eine serielle Bearbeitung in einer Polygonspiegelanwendung mit einer Scangeschwindigkeit von 400 m/s.

#### 4.2 300W ps-Laser / 8 Spots

Zunächst wurde ein 8-Spot-Aufbau in Kombination mit einem 300 W ps-Laser untersucht. Das allgemeine Konzept ist in Abb. 11 dargestellt und in [7] ausführlich beschrieben. Ein Laserstrahl mit 300 W @ 1064 nm und 10 ps Pulsen SRC (angepasst hinsichtlich Größe und Divergenzwinkel) wird durch eine DOE in 9 Strahlordnungen mit definierten Ausbreitungswinkeln BS aufgeteilt. Ein Fourier-Linsensatz FL1 und FL2 fokussiert und parallelisiert die Strahlen für die korrekte Einkopplung in einen 8-kanaligen akusto-optischen Modulator AOM. Der Strahlkamm nach dem Modulator wird durch ein Prismenpaar pAC-cx und pAC-cv räumlich komprimiert, um eine Strahlführung mit kleineren Optiken zu ermöglichen. Zwischen dem Prismenpaar wurde die Strahlableitung für den AOM platziert BD-AOM Die Multispot-Intensitätsverteilung im Ablationsbereich wird durch einen Aufbau aus drei Linsen TL1, TL2, TL3 gebildet und kann durch ein Dove-Prisma DP um die Propagationsachse gedreht werden.

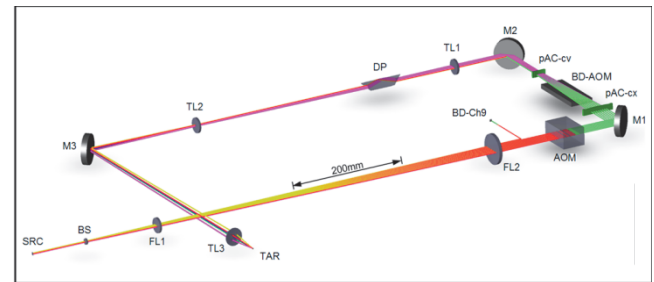


Abb. 11 Diffraktive Strahlteilung eines 300 W Lasers in 8 einzeln modulierbare Strahlen, Leistung / Strahl 29W ± 1W im Fokus.

Wichtige Faktoren dieses Mehrstrahl-Aufbaus sind die Pitch-Präzision, die Spot-Uniformität und die Effizienz der Strahlteilung durch das DOE in Kombination mit dem AOM. Der Pitch auf dem Werkstück beträgt 20 µm ± 0,5 µm und der 1/e<sup>2</sup>-Spotdurchmesser liegt bei 8 µm. Die Gesamtleistungsungleichförmigkeit zwischen den Maxima liegt unter 16 % (Abb. 12), und der Gesamtwirkungsgrad beträgt etwa 78 % auf dem Werkstück.

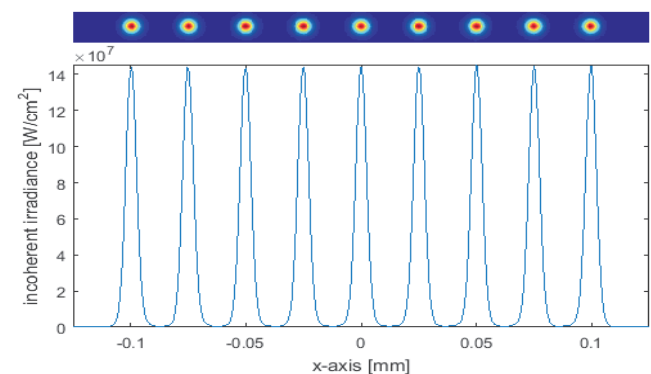


Abb. 12 Spots in der Werkstückebene

Die vertikalen Linien (erzeugt durch Laserpulse) in Abb. 13 wurden mit einer Pulswiederholrate von 1 MHz und einer Oberflächengeschwindigkeit von 15 m/s in die Kupferoberfläche graviert. Die Spots zeigen einen Abtragdurchmesser von ca. 12  $\mu\text{m}$  bei einem Abstand von 30  $\mu\text{m}$  und konnten innerhalb einer Fokustiefe von  $\pm 40 \mu\text{m}$  beobachtet werden, wie in Abb. 13 dargestellt.

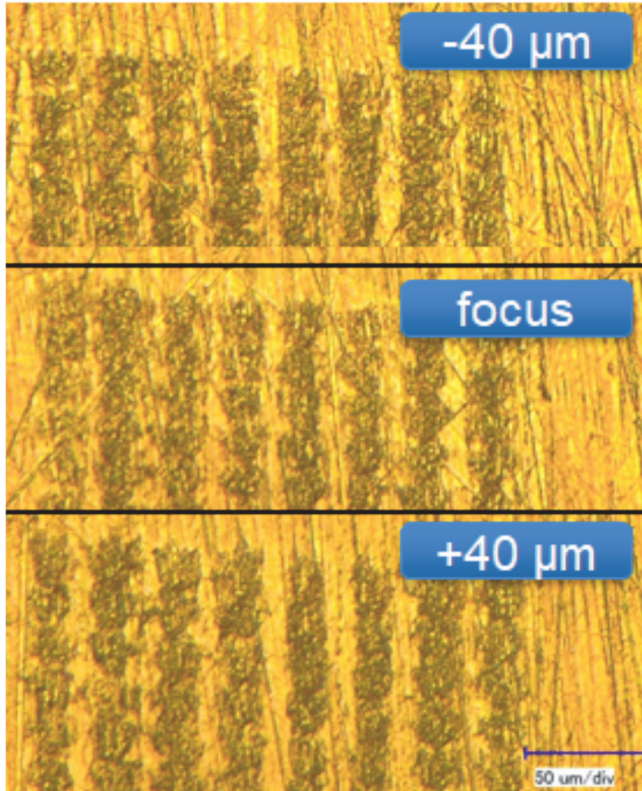


Abb. 13 Abtrag mit 8 parallelen spots

Die experimentellen Abtragraten wurden anhand von Tiefdrucknäpfchen (Abb. 14) untersucht

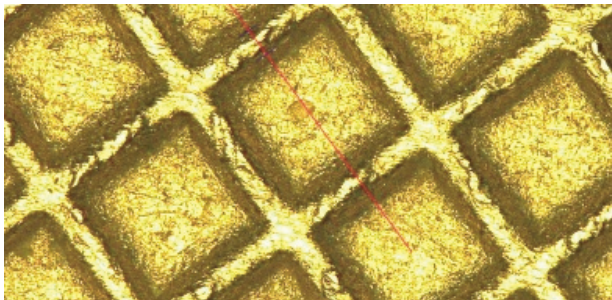


Abb. 14 Tiefdruckzellen,  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ , Tiefe  $24 \mu\text{m}$

Nach Synchronisation der 8 Strahlen wurde der Aufbau mit 300 W Laserleistung und bei 3 MHz Repetitionsrate und verschiedenen Fluenzen (1,6, 3,2, 4,8, 6,4 und 7,9  $\text{J}/\text{cm}^2$ , eingestellt durch einen externen Pulpicker) durch Gravieren von Tiefdrucknäpfchen mit einer Größe von  $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  und einer Stegbreite von  $35 \mu\text{m}$  bei einer Auflösung von 2000  $\text{l}/\text{cm}$  in Umfangsrichtung (bei einer Oberflächengeschwindigkeit von 16 m/s) und 5000  $\text{l}/\text{cm}$  in axialer Richtung strukturiert. Die erreichte Abtragtiefe/Schicht betrug  $4 \mu\text{m}$  bzw.  $24 \mu\text{m}$  nach 6 Durchgängen [4]. Dies entspricht einer Abtragraten von

$16,3 \text{ mm}^3/\text{min}$  in Kupfer (ca.  $2 \text{ mm}^3/\text{min}$  pro Strahl) (Abb. 15).

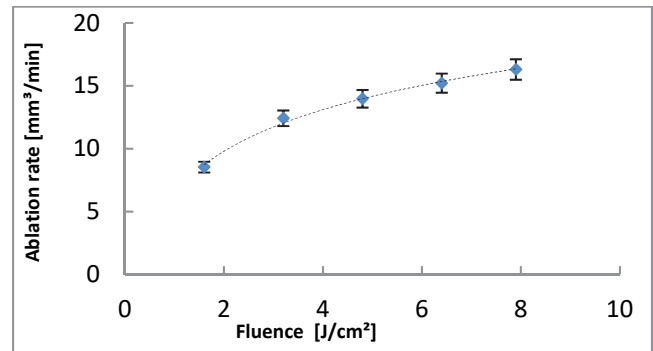


Abb. 15 Abtragraten von 8 parallelen Spots, abhängig von der Fluenz in Kupfer

### 4.3 500W ps-Laser / 16 Spots

In einem weiteren Schritt wurde ein ps-Laser mit einer mittleren Leistung von bis zu 500 W in einem Aufbau mit 16 Strahlen implementiert. Analog zu dem in Abb. 11 beschriebenen 8-Strahlengang reduziert ein 1-zu-17-Strahlteiler BS in Kombination mit zwei achtkanaligen akusto-optischen Modulatoren AOM1 und AOM2 (Abb. 16).

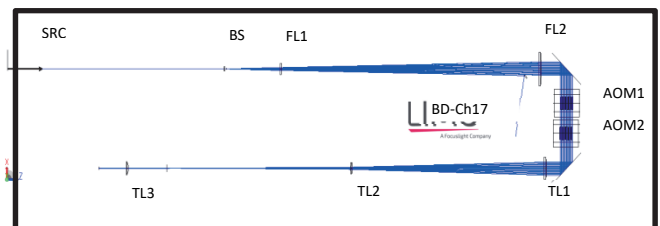


Abb. 16 Simulation der Strahlführung mit 16 Teilstrahlen

Die Multispot-Intensitätsverteilung im Ablationsbereich wird durch einen Aufbau aus drei Linsen TL1, TL2, TL3 gebildet und kann durch die AOMs moduliert werden. Aufgrund des räumlich begrenzten akustischen Feldes pro Strahl konnte der Zwischenbereich des AOM-Kristalls genutzt werden. Eine ausgeklügelte Anordnung von zwei 8-kanaligen AOMs, wie sie in Abb. 17 dargestellt ist, sorgt für eine sequenzielle Modulation der Teilstrahlen, je nach Ausbreitungsrichtung. Durch die in Ausbreitungsrichtung getrennten Schaltebenen der beiden Modulatoren wird durch den Bragg-Winkel der AOMs eine kleine laterale Verschiebung der Beamlets von  $< 30 \mu\text{m}$ , senkrecht zur Beamlet-Kammachse erzeugt, wie in Abb. 18 dargestellt. Dieser Positionsversatz kann durch eine Software-Synchronisationseinstellung kompensiert werden. Damit können auch die zugehörigen Prismenfeldpaare für die Strahlen-Kamm-Kompression vernachlässigt werden.

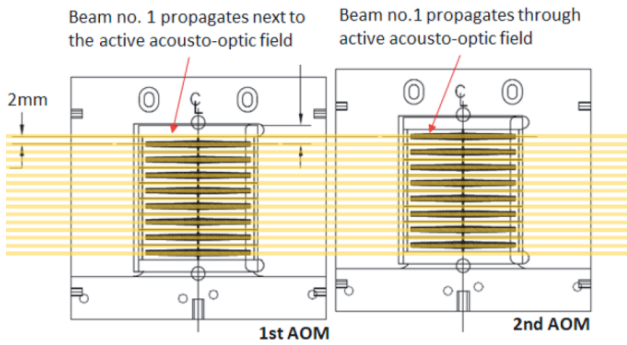


Abb. 17 Anordnung von zwei 8-Kanal-AOMs mit einer orthogonalen Verschiebung von 2 mm

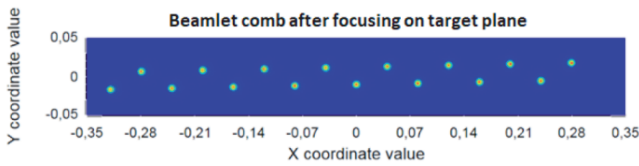


Abb. 18 Schematische Darstellung der Strahlen-Kämme in der Zielebene

Nach Synchronisation der 16 Strahlen wurde der Aufbau mit 500 W Laserleistung und bei 1 MHz Repetitionsrate und verschiedenen Fluenzen (2,2, 4,1, 7,9, 10,9 und 13,2 J/cm<sup>2</sup>, eingestellt durch einen externen Pulpicker) an der Tiefdruckzelle aus Abb. 3 mit einer Oberflächengeschwindigkeit von 10 m/s untersucht. Die erreichte Abtragtiefe/Schicht betrug 8,5 µm, bzw. 85 µm nach 10 Durchgängen. Dies entspricht einer Abtragrate von 27,09 mm<sup>3</sup>/min in Kupfer (ca. 1,7 mm<sup>3</sup>/min pro Strahl) (Abb. 19).

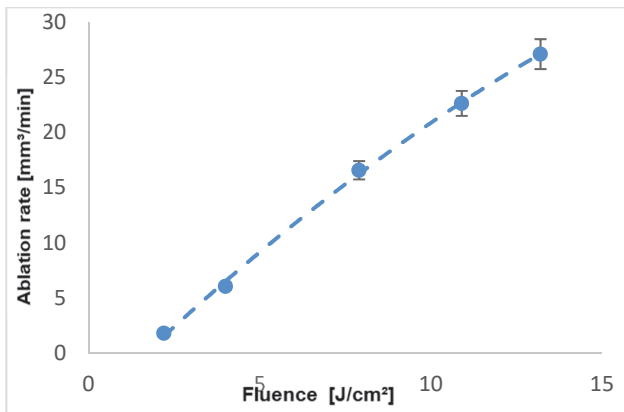


Abb. 19 Abtragrate von 16 parallelen Spots

## 5. Beispiele

Im folgenden Abschnitt werden die Anwendungen von vier verschiedenen Rolle-zu-Rolle Anwendungen beschrieben.

### Intaglio

Drucktechniken, wie z.B. der Intaglio Druck (auch Kupferstich oder Stahlstich) können durch die direkte Laserbearbeitung nachgebildet werden. Typisch für diese Drucktechnik ist, dass mehr Farbe aufgetragen wird, als es für eine gut lesbare Schrift notwendig wäre, wodurch

diese Bereiche erhaben sind. Insbesondere bei Sicherheitsanwendungen wird diese haptische Struktur als Sicherheitsmerkmal genutzt. Die schmelzfreie direkte 3D-Strukturierung des Metalls, die Beschleunigung der Produktion, der Wegfall mehrerer lithographischer Schritte und eine erhöhte Auflösung gegenüber der mechanischen Bearbeitung durch Diamantstichel sind einige Vorteile. Ein Beispiel ist die kleinste erreichbare Buchstabenhöhe. Mit einem 10 µm-Spot wurden Buchstabenhöhen von 150 µm, 100 µm und 50 µm in Kupfer mit einer Tiefe von 50 µm in Buchstaben-Guilloches graviert (Abb. 20).



Abb. 20 In Kupfer gravierte Buchstaben Guilloches, Höhen 150 µm, 100 µm, 50 µm, Tiefe 50 µm



Abb. 21 Strukturierte Platte aus Abb. 19, gedruckt auf ein Papiersubstrat im R2R-Verfahren

In einer Intaglio-Druckmaschine eingesetzt, konnten die Buchstabenhöhen auf einen Papierträger übertragen werden, wie in Abb. 21 gezeigt. Selbst die kleinste Buchstabenhöhe von 50 µm war auf dem gedruckten Substrat lesbar.

### Metallblech-Prägung

Aluminiumbleche mit Dicken bis zu 1,5 mm und Größen von 1-2 m<sup>2</sup> für technische und dekorative Anwendungen können durch mikrostrukturierte Stahlzylinder mit Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 4 m<sup>2</sup>/min rotativ geprägt werden. Die Übertragung der Struktur auf das Aluminiumblech erfolgt durch einen Verformungs- und Materialfluss, der eine sehr originalgetreue Kopie des Prägewerkzeugs ermöglicht (Abb. 22).

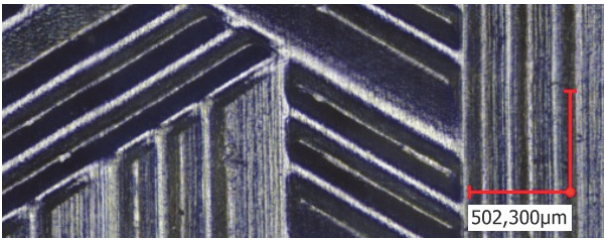


Abb. 22 Draufsicht auf ein geprägtes Aluminiumblech mit 1 mm Dicke

Es wurde eine Strukturtiefe von bis zu 120 μm auf das Aluminiumblech übertragen (200 μm sind möglich), wie in Abb. 23.

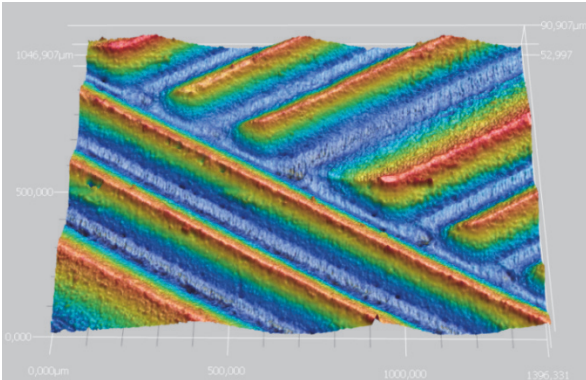


Abb. 23 In Aluminium übertragene Struktur mit Tiefen bis zu 120 μm

Traditionell wurden die Prägezyylinder in mehreren Schritten durch lithographische Verfahren bearbeitet. Ein echter kontinuierlicher Verlauf in die Tiefe war dabei bisher nicht möglich. Mittels eines ultrakurz gepulsten Lasers konnten in einem Schritt durchgehende 3D-Elemente direkt in die Stahloberfläche graviert werden (Abb. 24).

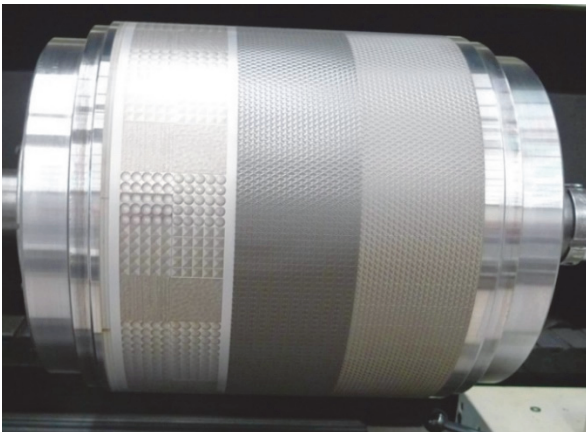


Abb. 24 Mikrostrukturierte Stahlzylinder

Ein Nachteil der Direktgravur mit einem Laserspot war in der Vergangenheit der hohe Zeitaufwand für die Bearbeitung. Die 3D-Strukturierung von 1m<sup>2</sup> Prägezyylinderfläche mit einer Tiefe von 200 μm durch einen USP-Laser (P = 70 W, Pulsdauer: 10 ps, Pulswiederholrate 1,6 MHz) dauerte ca. 14 Tage. Mit einem 500 W-Laser und 16 Spots wird die Gravurzeit auf 2 Tage reduziert. Dies ist eine enorme Zeitreduzierung und ermöglicht einen wirtschaftlichen Prozess.

## Mikroprägung

Für die Funktionalisierung von Oberflächen für Soft-touch-, refraktiv-optische oder hydrophobe Flächen werden Strukturgrößen von 20 μm – 50 μm benötigt. Diese Strukturen können dann durch Heißprägeverfahren auf eine Folie übertragen werden, die zur gezielten Lichtführung in Flachbildschirmen eingesetzt werden kann. Auch Fresnel- oder Lentikularlinsen sind als Dekoder möglich. Die Reibung der Haut auf Kunststoffoberflächen kann durch definierte Mikrostrukturen und damit die Haptik eingestellt werden. Mittels dieser „Soft-Touch“-Strukturen können auch die Reibwerte richtungsabhängig definiert werden. Das Reibungsverhalten dieser mikroskalierten Texturen wird durch die Eigenschaften des Stratum corneum bestimmt. Da das Stratum corneum ein hohes Elastizitätsmodul besitzt, führt eine Optimierung durch Mikrostrukturen zu Oberflächen mit sehr geringer Reibung [4]. Zum Beispiel wurde eine Halbkugel mit einem Durchmesser von 45 μm und einer Tiefe von 10 μm als Negativ in eine Edelstahloberfläche graviert, wie in Abb. 25 gezeigt.

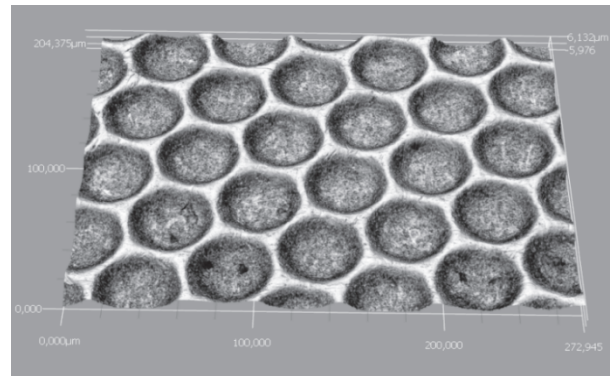


Abb. 25 Soft-Touch-Struktur: Durchmesser: 45 μm, Tiefe: 10 μm

Die Oberfläche wurde in eine Kunststoffolie abgeprägt und ist in Abb. 26 dargestellt.

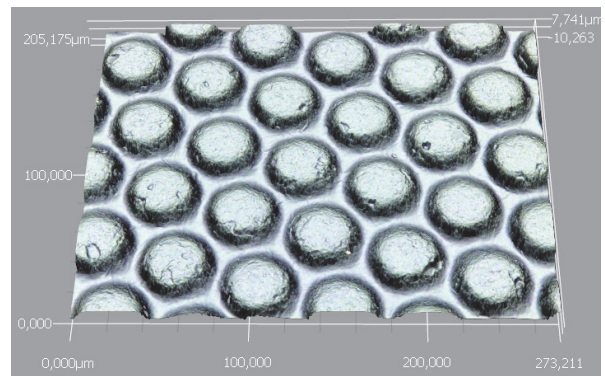


Abb. 26 Replica von Master aus Abb. 26

Rolle-zu-Rolle Druck- und Prägeverfahren sind Anwendungen mit hohem Durchsatz, aber oft in der Übertragung von hochaufgelösten Elementen (in μm bis nm Größe) limitiert. Nanostrukturierungsverfahren könnten Transferauflösungen bis in den Submikrometerbereich liefern und finden auch in Bezug auf Rolle-zu-Rolle-Anwendungen immer mehr Beachtung. Antibakterielle

oder hydrophobe Strukturen könnten z.B. im Lebensmittelbereich für Joghurtdeckel und -verpackungen eingesetzt werden. Biomedizinische Strukturen werden wiederum für das gezielte Wachstum von Zellen im Bereich des Tissue-Engineerings eingesetzt, z. B. Linienstrukturen mit 4  $\mu\text{m}$  Breite und 10  $\mu\text{m}$  Tiefe (Abb. 27).

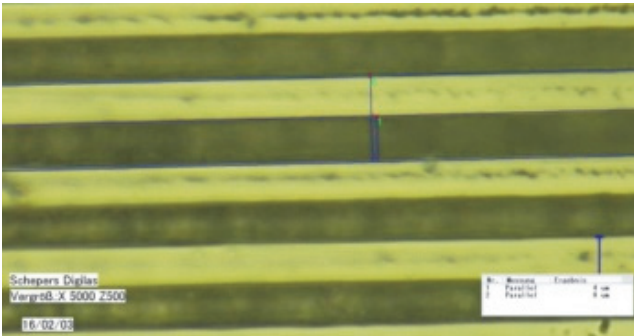


Abb. 27 Linienbreite: 4  $\mu\text{m}$ , Abstand: 10  $\mu\text{m}$ , Tiefe 10  $\mu\text{m}$  in Edelstahl

## 6. Resümee

In dieser Arbeit wurden verschiedene Multi-Spot-Ansätze für die USP-Laserbearbeitung mit hoher Qualität und hohem Durchsatz beschrieben. Es konnte mit einem 300-W-ps-Laser, aufgeteilt in 8 Strahlen mit einem Spotdurchmesser von 10  $\mu\text{m}$ , ein Abtragsvolumen von 16,3  $\text{mm}^3/\text{min}$  erzielt werden. Mit diesem Aufbau wurde eine Prägeform mit einer Größe von 1m x 1,2m mit einer Auflösung von 5080 DPI strukturiert (Abb. 28).

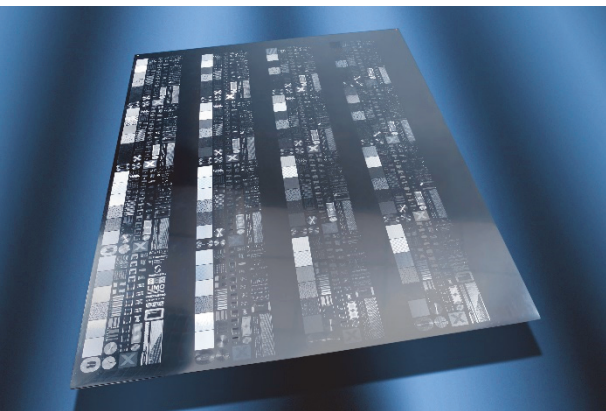


Abb. 28 mit 8 parallelen Spots strukturierte 1m x 1,2m Kupferplatte (anschließend verchromt)

In einem weiteren Schritt wurde dieses Konzept auf 16 Strahlen erweitert. So konnte mit einem 500-W-Laser, der in 16 Strahlen mit Spotdurchmesser von 13  $\mu\text{m}$  moduliert wird, eine Abtragsrate von 27  $\text{mm}^3/\text{min}$  erzielt werden. Mit Hilfe dieser Verfahrenstechniken wurden Werkzeuge für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung zur Prägung von optischen, haptischen, antiseptischen, zellwachstumsfördernden und optisch-diffraktiven Strukturen hergestellt.

Durch das Aufbringen spezifischer funktionaler Mikrostrukturen können die Eigenschaften von Oberflächen maßgeblich beeinflusst werden. Die Größe dieser Strukturen variiert in Abhängigkeit von der Funktion.

Diese Arbeit wurde teilweise vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) im Rahmen des Projekts MULTISURF gefördert.



## References

- [1] J. John, Y.Y. Tang, J.P. Rothstein, J.J. Watkins, K.R. Carter: "Large-area, continuous roll-to-roll nanoimprinting with PFPE composite molds", *Nanotechnology* Vol. 24, 2013
- [2] S. Bruening, K. Du, A. Gillner: "Ultra-fast micro machining with multiple ultra-short pulsed laser sources", *Physics Procedia*, Volume 83, Pages 167 – 181, 2016
- [3] S. Bruening, G. Hennig, S. Eifel, A. Gillner: "Ultra fast scan techniques for 3D- $\mu\text{m}$  structuring of metal surfaces with high repetitive ps-laser pulses", *Physics Procedia*, Volume 12, Part B, Pages 105 – 115, 2011
- [4] K. Du, S. Bruening, A. Gillner: "High-picosecond laser with 400W average power for large scale applications", *Proceedings of SPIE*, 8244:21, 2012
- [5] Y. Hu, Y. Chen, J. Ma, J. Li, W. Huang, J. Chu: "High-efficiency fabrication of aspheric microlens arrays by holographic femtosecond laser-induced photopolymerization", *APPLIED PHYSICS LETTERS* 103, 141112 (2013)
- [6] Y. Hu, J. Ma, Y. Chen, J. Li, W. Huang, J. Chu: "Fast Bits Recording in Photoisomeric Polymers by Phase-Modulated Femtosecond Laser", *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 26, NO. 11, JUNE 1, 2014
- [7] M. Jarczyński, T. Mitra, S. Bruening, K. Du, G. Jenke: "Parallel processing of embossing dies with ultra fast lasers", *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII*, San Francisco, 2018
- [8] M. Jarczyński, T. Mitra, S. Bruening: "Ultra-short pulsed multi-beam processing head for parallel ultra-fast micromachining", *Journal of Laser Applications* 29, 022214 (2016)