

Direkte, laserbasierte Herstellung von Mikrolinsenarrays aus Glas

Martin Kahle, Daniel Conrad, Stefan Fricke

ifw Jena - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH,
Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena

Mikrolinsenarrays aus Glas sind optische Bauelemente, die durch ihre Komplexität die Funktion vieler größerer Linsen gleichzeitig übernehmen können. Damit lassen sich optische Anordnungen miniaturisieren und leichter machen. Die Herstellung solcher Elemente ist aber insbesondere bei mittleren und kleinen Stückzahlen eine Herausforderung. Am ifw Jena werden daher zwei direkte Herstellungsmethoden solcher Elemente untersucht: Der Laserabtrag mit Ultrakurzpulslasern sowie der Abtrag und die Politur mit CO₂-Lasern. Die Experimente zeigen eine gute Homogenität der Linsen sowie eine hohe Prozessgeschwindigkeit.

Microlens arrays made of glass are optical components which, due to their complexity, can fulfill the function of many larger lenses at the same time. Optical arrangements can thus be miniaturized and made lighter. The production of such elements can be a challenge, especially for medium and small quantities. Therefore, at the ifw Jena, two direct production methods of such elements are being investigated: laser ablation with ultrashort pulsed lasers and ablation and polishing with CO₂ lasers. The experiments show a good homogeneity of the lenses as well as a high process speed.

1. Einleitung

Das fortschreitende Verständnis der Optik und die Forderungen des Marktes nach Platz- und Gewichtersparnis bei optischen Geräten begünstigen den Trend zu Freiformoptiken und Mikrolinsenarrays (MLA). Letzteres sind Arrangements von vielen identischen Linsen auf einem Träger, wobei die Linsen jeweils kleiner als einen Millimeter sind. Diese optischen Elemente erlauben die Lösungen von optischen Aufgaben, die zuvor eine Vielzahl sphärischer Linsen aus verschiedenen Materialien erforderten. Durch den Einsatz dieser komplexeren Optiken lassen sich Abbildungsfehler vermeiden, Masse und Gewicht einsparen und auch völlig neue Effekte erzielen, wie zum Beispiel die quasi-3D-Aufnahme in Lichtfeldkameras oder die Homogenisierung von Laserstrahlen.

Von tragbaren Anwendungen in Konsumgütern wie Smartphones, mobilen Messgeräten und Diagnosegeräten bis hin zu Weltraumanwendungen bringt die Integration mehrerer Funktionen in einem optischen Element enorme Vorteile. Neben der Einsparung von Gewicht und Platz sind solche Optiken mechanisch weit weniger empfindlich, da weniger Funktionsteile gegeneinander verrutschen können. In einigen Fällen lassen sich diese optischen Funktionen sogar direkt in Oberflächen (z.B. Fenster) integrieren, so dass ein monolithisches Design vorliegt [1]. Mögliche Einsatzgebiete von Mikrolinsenarrays sind im Folgenden aufgeführt:

- Medizintechnik: Sensorik in Endoskopen [2], Abbildung in Laserskalpellen, Homogenisierung von Laserlicht zur Haarentfernung/Tattoo-Entfernung [3]
- Raumfahrt: Miniaturisierung, Funktionsintegration und Gewichtseinsparung von optischen

Elementen zur Himmelsbeobachtung, Abstandssensorik und Erdbeobachtung

- Telekommunikation: Ein-/Auskopplung in Lichtwellenleiter in Glasfaserkabeln
- Produktion: Lichthomogenisierung in der Lasermaterialbearbeitung, Miniaturisierung und Integration von Optik in maschineller Sensorik
- Wissenschaft und Optik: Abbildung in Lichtfeldfotografie (Plenoptische Kamera) [4], Messung von optischen Wellenfronten mit Shack-Hartmann-Sensor [5]
- Konsumgüter: Miniaturisierung von Abbildungsoptik in Smartphones u.ä., Lichthomogenisierung für Beleuchtungszwecke und Projektoren [6]

Die Herstellung derartiger nicht-klassischer Optiken ist jedoch schwierig, da diese nicht durch rotationssymmetrische Schleif- und Läppwerkzeuge bearbeitet werden können. Optiken aus Kunststoff können bereits durch Umformprozesse in ausreichender Qualität hergestellt werden, erfordern aber eine aufwändige Prozessentwicklung und sehr teure Werkzeuge, die einen Einsatz dieser Bauelemente bei geringen Stückzahlen unwirtschaftlich macht. Aufgrund der spezialisierten Anwendung von MLA in High-Tech-Produkten werden aber im Allgemeinen kleine Stückzahlen bis hin zu Einzelstücken benötigt. Komponenten aus Glas sind jenen aus Kunststoffen in vielen Anwendungsfeldern zudem deutlich überlegen, was die thermische, chemische und UV-Beständigkeit angeht. Außerdem haben sie ein breiteres Spektrum an optischen Parametern wie verfügbare Brechungsindizes und Dispersion, sowie eine geringere Restabsorption und sind daher flexibler einsetzbar.

Für die Herstellung von Mikrolinsenarrays aus Glas gibt es nur wenige wirtschaftliche Methoden. Einzelne Elemente können zwar durch Fotolithographie und Ionenstrahlätzen hergestellt werden, dies benötigt jedoch Masken für die Lithographie, die stückzahlunabhängige Kosten pro Design verursachen. Außerdem dauert der Prozess des Ionenstrahlätzens relativ lange, wenn Strukturen abgetragen werden müssen, die tiefer als einige Mikrometer sind. Praktisch lassen sich damit also nur flache Mikrolinsenarrays herstellen.

Laserverfahren bieten hingegen die Möglichkeit, durch den Abtrag und die Politur von optischen Gläsern direkt Mikrolinsenarrays in Glas herzustellen. Zudem sind dabei weit weniger Prozessschritte nötig, was Zeit und Kosten spart. Daher werden am ifw Jena verschiedene Laserverfahren untersucht, um Mikrolinsenarrays direkt herzustellen, sowohl mit Ultrakurzpuls-Laser (UKP) als auch mit CO₂-Laserstrahlen. Der Prozess gliedert sich jeweils in Konturabtrag und Politur. Während die Politur in jedem Fall mittels CO₂-Laser durchgeführt wird, werden für den Konturabtrag sowohl ein Ultrakurzpuls-Laser, als auch ein Kurzpuls-CO₂-Laser erprobt. Erste Ergebnisse der CO₂-Laserexperimente wurden bereits veröffentlicht [7].

2. Versuchsaufbau

Die Experimente werden an Quarzglas und Boro float® 33 (Schott) durchgeführt. Als geometrische Zielparameter dienen typische MLA-Designs von Projektpartnern: Die Linsenradien liegen im Bereich weniger Millimeter, die Linsenabstände um 300-500 µm

Die Experimente zum Abtrag mit dem UKP-Laser werden mit einem Lumera Hyper Rapid mit ca. 7 ps Pulsdauer durchgeführt. Dabei wurde eine Wellenlänge von 355 nm benutzt, die Pulsrepetitionsrate lag bei 200 kHz und die Durchschnittsleistungen lagen im Bereich um 1 W. Für die Bearbeitung wurde der Laserstrahl mit einem Galvanometerscanner über die Probenoberfläche geführt und durch eine F-Theta-Optik mit ca. 100 mm Brennweite fokussiert.

Für den Abtrag mit dem CO₂-Laser wurde ein FEHA microstorm verwendet. Dieser emittiert Pulse von etwa 200 ns Länge bei 10,6 µm Wellenlänge. Die verwendeten Repetitionsraten lagen im Bereich von 10-25 kHz bei Durchschnittsleistungen bis 80 W. Der Laserstrahl wird durch einen Scanlab Hurriscan über das Werkstück geführt und von einem F-Theta-Objektiv auf einen Durchmesser von 140 µm fokussiert. Abbildung 1 zeigt den Probenstisch unter dem Galvoscanner.

Die geringe Pulsdauer von 200 ns wird verwendet, um die Wärmeeinflusszone um die Laserabtragsstelle herum zu reduzieren. Der CO₂-Laserabtrag an Quarzglas konnte daher ohne Vorwärmung durchgeführt werden. Zur Bearbeitung anderer Gläser und für den Politurprozess steht eine Keramikheizplatte der Firma Elstein (1 kW Heizleistung, max. 1000 °C) zur Verfügung.

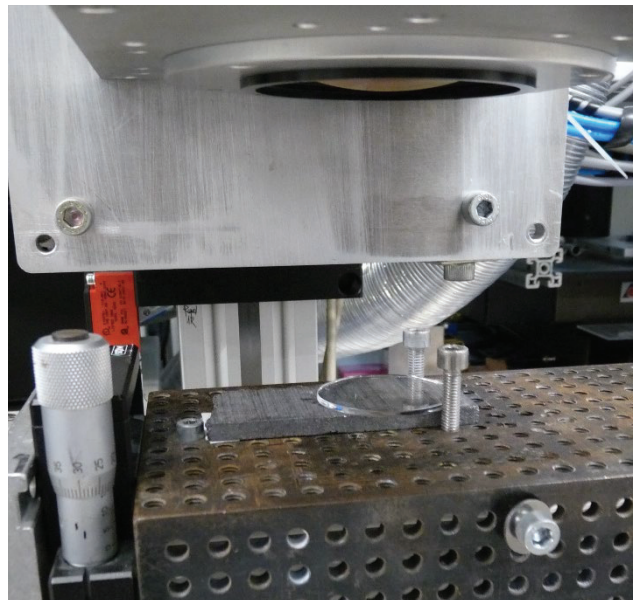


Abbildung 1: Quarzprobe unter F-Theta-Linse

Der Politurprozess soll später im Projekt durchgeführt werden. Dafür wird ein Politurverfahren verwendet werden, welches bereits wissenschaftlich untersucht wurde [8]. Hierbei wird der Laserstrahl sehr schnell linienförmig über das Werkstück gelenkt, während dieses langsam senkrecht zur Linienrichtung verfährt. Das Glas ist dabei im Allgemeinen vorgewärmt, so dass der pyrometrisch geregelte Laserstrahl weniger Energie einbringen muss, um die Erweichungstemperatur zu erreichen.

Zur Beurteilung der Abtragsergebnisse wird ein Laser-Scanning-Mikroskop der Firma Keyence verwendet (VK-X100). Dessen Software erlaubt die Aufnahme von zweidimensionalen Höhenprofilen, Schnitten, Radienmessungen und Rauheitsmessungen.

Hintergrund der Herangehensweise mit zwei Laserarten ist die Tatsache, dass UKP-Laser relativ teuer sind und vergleichsweise geringe Abtragsraten bewirken; oft in der Größenordnung von 1 mm³ pro Minute und pro Watt Laserleistung. Andererseits lassen sich mit UKP-Lasern sehr präzise dünne Schichten (< 1 µm) abtragen und mit Fokusgrößen im Bereich von 20 µm sehr feine geometrische Konturen abtragen. Durch die ultrakurzen Pulse wird das Substrat thermisch praktisch nicht belastet. Daher können auch Gläser mit hohen Ausdehnungskoeffizienten ohne Vorwärmung bearbeitet werden.

CO₂-Laser für den Glasabtrag haben gänzlich andere Eigenschaften: Die Geräte sind deutlich billiger, als UKP-Laser. Durch die lineare Absorption und höhere Leistungen ist die absolute Abtragsrate höher und die Präzision in der Abtragtiefe ist begrenzt. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Lasern langen Wellenlänge sind die Laserfoki oft größer und es lassen sich kaum geometrische Features kleiner als 100 µm erzeugen. Bei entsprechender Regelbarkeit des Lasers lassen sich außerdem der Konturabtrag und die Politur auf einem Gerät, also in einer Aufspannung durchführen, was den Prozess vereinfacht.

Daher ist davon auszugehen, dass CO₂-Laser wirtschaftlicher arbeiten können, wenn sich der Prozess mit ihnen realisieren lässt. Die Frage, ob sich die Oberflächenkontur durch Laserabtrag und -politur ausreichend genau einstellen lässt, ist aber noch offen.

3. Ergebnisse

3.1 CO₂-Laser

Zunächst wurden mit dem Kurzpuls-CO₂-Laser Parameteruntersuchungen durchgeführt. Hier stand insbesondere die Frage im Fokus, welche minimale Tiefe noch zuverlässig abgetragen werden kann und welche lateralen Strukturgrößen dabei entstehen. Eine Übersicht über die Abtragsexperimente mit 12,5 kHz ist in Abbildung 2 zu sehen.

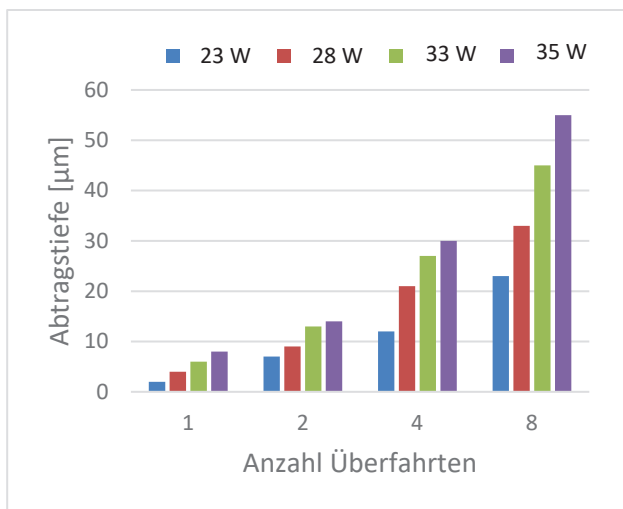


Abbildung 2: Exemplarische Abtragstiefen für verschiedene CO₂-Laserparametersätze

Die erreichbaren Abtragstiefen sind genau in dem Bereich, der für die Herstellung von MLA relevant ist. Mit dem hier verwendeten Laser lassen sich Schichten ab etwa 5 µm Dicke reproduzierbar abtragen. Mit höheren Pulsenergien und mehreren Überfahrten sind aber auch Abtragstiefen von mehreren 100 µm problemlos herstellbar.

Die volle Breite der Abtragungsspuren beträgt zwischen 100 und 200 µm und ist damit ausreichend fein für die angestrebten MLA-Designs. Die Abtragsrate bei diesen Versuchen betrug bis zu 25 mm³/min, so dass sich auch große MLA mit mehr als 100 µm Linsenhöhe in wenigen Minuten herstellen lassen. Insbesondere im Vergleich zum Ionenstrahlätzen (reactive ion etching; RIE) ist diese Rate enorm. Dort sind je nach Material Ätztiefen von Nanometer bis Mikrometer pro Minute möglich [9]. Eine typische Abtragungsspur ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Spur hat ein näherungsweise gaußförmiges Profil und die Rauheit liegt im Bereich von 1-2 µm.

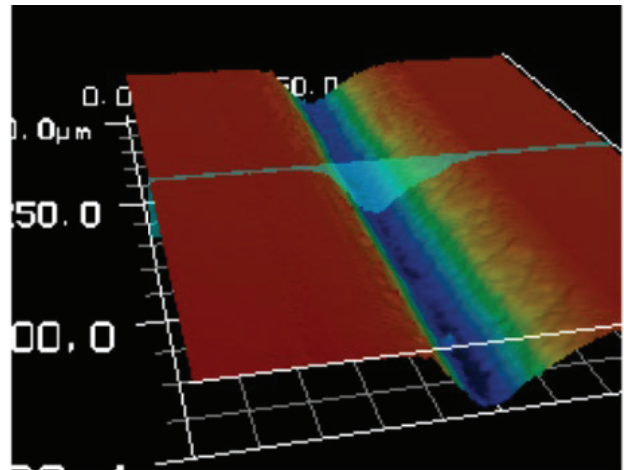
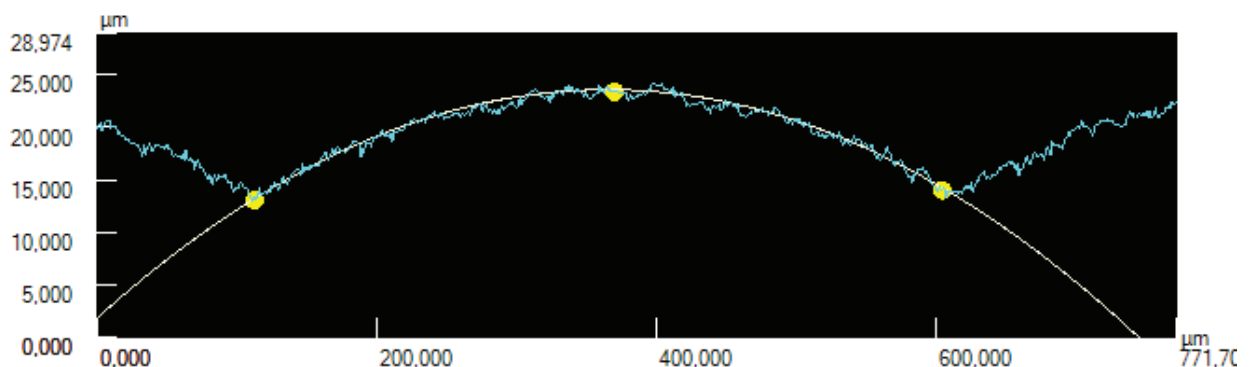


Abbildung 3: Oberflächenstruktur nach dem CO₂-Laserabtrag

Die Experimente haben außerdem gezeigt, dass sich Quarzglas mit dem Kurzpuls-CO₂-Laser bei geeigneter Parameterwahl ohne Schmelzerscheinungen abtragen lässt. Allerdings kann die Thermik im Glas bei hohen Laserleistungen durchaus Einfluss auf den Abtrag haben.

3.2 UKP-Laser

Mit dem UKP-Laser wurden an Quarzglas und Borofloat® 33 in der gleichen Art und Weise Parameteruntersuchungen durchgeführt um Abtragsparameter zu finden, welche einen feinen aber zügigen Abtrag bei gleichzeitig geringer resultierender Rauheit bewirken. Danach konnten mit den passenden Parametern bereits fertige



Profil1	Horiz.Abst.	Höh.Unters.	Durchs.Höh.	Winkel	Quers.Lä.	Quers.Fl.	R	Anmerk.
Alle	771,705µm	2,474µm	19,281µm	0,184°	810,916µm	14900,207µ...		
Seq.1							3075,397µm	

Abbildung 4: Schnitt durch eine mit dem UKP-Laser gefertigte Mikrolinse aus Borofloat® 33

Linsenprofile abgetragen werden. Abbildung 4 zeigt den Schnitt durch ein resultierendes Linsenprofil. Zu dessen Herstellung wurden zwanzig Materialschichten abgetragen. Es zeigt sich, dass die geometrischen Zielparame-ter wie Durchmesser und Radius präzise realisiert werden konnten. Die resultierende Rauheit R_a ohne Politur liegt im Bereich um $0,4 \mu\text{m}$.

Für die Bearbeitung mit dem UKP-Laser wurde zunächst eine Geometrie gewählt, die nur moderate Abtragstiefen von $20 \mu\text{m}$ erfordert. Insgesamt war von dem Substrat etwas mehr als 1 mm^2 Material abzutragen, um die Linsenkontur freizulegen. Dieser Prozess dauerte einschließlich aller Maschinenzeiten etwa 4 Minuten. Darin sind auch Zeiten zur Spiegelpositionierung enthalten, in denen der Laser ausgeschaltet war. Im Vergleich zum Ionenstrahlätzen ist also auch dieser Prozess sehr schnell.

Der UKP-Abtragsprozess verläuft stabil und reproduzierbar. Die einzigen Störungen, die gefunden wurden, sind in Abbildung 5 dargestellt. Wie sich herausgestellt hat, wurden diese durch eine fehlerhafte Charge Substrate verursacht. Bei einer Abtragstiefe von $20 \mu\text{m}$ schlugen sich Kratzer oder Inhomogenitäten, die schon vor der Bearbeitung im Material waren, in derartigen Fehlern nieder. Durch die Prüfung der Substrate vor der Bearbeitung konnte das Problem gelöst werden.

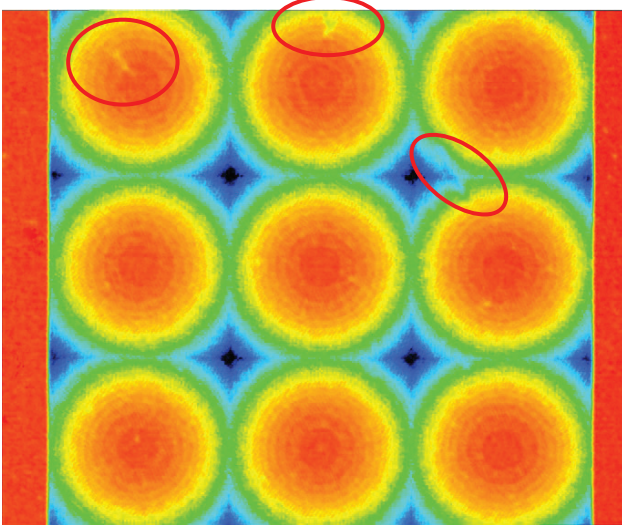


Abbildung 5: Störungen in UKP-gefertigten Linsenprofilen

4. Zusammenfassung und Ausblick

Aufbauend auf den bisherigen Experimenten sollen am CO_2 -Laser Strategien erprobt werden, die gaußförmigen Abtragungsspuren so zu kombinieren, dass die gewünschten Linsenformen entstehen. Dazu werden die Zielprofile in Schichten zerlegt, die dann einzeln mit dem Laser abgetragen werden.

Aktuell werden die Politurexperimente mit einem kontinuierlich arbeitenden CO_2 -Laser durchgeführt. Zumindest von planen Flächen ist aus der Literatur bekannt, dass sich damit die Rauheit der Oberflächen etwa um den Faktor 100 verbessern lässt [8]. In weiteren eigenen Untersuchungen konnte auch schon gezeigt werden,

dass sich mit dieser Technik Mikrolinsenarrays polieren lassen, ohne dass jedoch eventuelle Formveränderungen im Detail quantifiziert werden konnten [7]. Die Experimente in diesen Projekten sollen zeigen, wie sich die Politur auf die Linsenstrukturen auswirkt. Sollte es dabei zur Veränderung der Zielgrößen wie dem Linsenradius kommen, so kann dieser Einfluss beim Abtragsprozess ggf. vorkompensiert werden, so dass erst nach der Politur der gewünschte Radius bei passender Rauheit vorliegt.

Die ersten Ergebnisse legen jedenfalls nahe, dass sich durch den Abtrag mittels Ultrakurzpulslaser die Zielkonturen ausreichend genau fertigen lassen. Für Linsen mit einem Pitch von mehr als $150 \mu\text{m}$ sind dafür auch wesentlich günstigere CO_2 -Laser aussichtsreich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 49MF200003 und ZF4236511BA9) für die Förderung der Projekte sowie bei den Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] C. De Clerq et al., "ELOIS: an innovative spectrometer design using a free-form grating", Proc. SPIE 9626 (2015)
- [2] D. Musick, Master Thesis, University of Jena, 2016: Methods for high resolution Endoscopes
- [3] Keeney, Scott, and Zhe Huang. "Single-emitter diode based light homogenizing apparatus and a hair removal device employing the same." U.S. Patent Application No. 12/976,466.
- [4] Johannsen, Ole, et al. "On the calibration of focused plenoptic cameras." *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 302-317.
- [5] Lin, V., et al. "Design and fabrication of long-focal-length microlens arrays for Shack-Hartmann wavefront sensors." *Micro & Nano Letters* 6.7 (2011): 523-526.
- [6] Chen, Cheng Huan, Chien Chuan Chen, and Po Hung Yao. "Microlens array homogenizer for laser illuminated projector." *Key Engineering Materials*. Vol. 364. Trans Tech Publications, 2008.
- [7] Schmidt, Thomas, and Daniel Conrad. "Micro lens arrays made by CO_2 -laser radiation." *Seventh European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. Vol. 11478. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [8] Hildebrand, Jörg, et al. "Laser beam polishing of quartz glass surfaces." *Physics Procedia* 12 (2011): 452-461.
- [9] Williams, Kirt R., Kishan Gupta, and Matthew Wasilik. "Etch rates for micromachining processing-Part II." *Journal of microelectromechanical systems* 12.6 (2003): 761-778.