

Untersuchungen zur Herstellung rotationssymmetrischer mikrooptischer Bauelemente auf Basis der sequentiellen Maskenprojektion

Eric Syrbe, Sebastian Büttner, Michael Pfeifer, Steffen Weißmantel

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

Die Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser ermöglicht die Herstellung von Mikrooptiken in Gläsern und anderen Materialien mit großer Energiebandlücke. Für die Strukturierung von Mikrolinsen haben wir eine neue Herstellungsmethode und den dafür benötigten Experimentaufbau entwickelt. Der Prozess basiert auf dem Maskenprojektionsverfahren und nutzt eine Vielzahl unterschiedlicher Kreismasken, die nacheinander im Laserstrahlengang platziert werden, um einen ringförmigen Ablationsbereich zu formen. Durch die Verwendung eines entsprechend konzipierten Maskensatzes ist es möglich, eine Oberfläche mit einer definierten sphärischen Form herzustellen. Es werden der gesamte Prozess, der Experimentaufbau sowie die Ergebnisse vorgestellt.

1. Einleitung

Aktuelle technische Innovationen beruhen häufig auf einer verbesserten Effizienz oder einer kompakteren Bauweise. Letzteres erfordert eine Miniaturisierung der eingebauten Teile, was eine ständige Herausforderung für die beteiligten Fertigungsverfahren darstellt. Treibende Kräfte dahinter sind u.a. die Computer- und Kommunikationstechnologien, denn die Datenübertragung über das klassische Kupferkabel ist in der Übertragungsgeschwindigkeit begrenzt und wird umso anfälliger für elektromagnetische Störfelder, je größer die übertragene Datenmenge pro Sekunde ist. Eine Lösung bietet die optische Datenübertragung, die unempfindlich gegenüber Störeinflüssen ist und eine geringe Signaldämpfung aufweist, so dass Signale über weite Strecken nahezu verlust- und fehlerfrei übertragen werden können. Die Einkopplung der optischen Signale in immer kleinere wellenleitende Strukturen, wie bspw. Monomode-Fasern, erfordert Mikrooptiken mit bestmöglicher Formgenauigkeit und geringer Oberflächenrauheit. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde eine breite Palette von Verfahren entwickelt. Für die Herstellung von Mikrooptiken aus Polymeren werden vor allem Präge- [1] und additive Verfahren [2,3] eingesetzt. Großes Entwicklungspotential besteht jedoch noch bei der Herstellung von Mikrooptiken in Glasmaterialien und besonders in hochwertigem Quarzglas. Nur wenige Verfahren eignen sich für die Bearbeitung dieses Materials, das meistgenutzte ist die Lithografie. Die neuesten Entwicklungen setzen jedoch zunehmend Femtosekunden- [4] und CO₂-Laser [5] oder eine Kombination aus beiden [6] ein, um die gewünschte Linsenqualität zu erreichen. Der Ansatz, den wir seit einigen Jahren verfolgen, ist die Kombination von Excimer-Lasern mit dem Maskenprojektionsverfahren. Es wurde erfolgreich gezeigt, dass mit den zahlreichen Strukturierungsmethoden, die im Laufe der Jahre entwickelt wurden, verschiedenste Mikrooptiken hergestellt werden können. Doch wie auch bei anderen Laserstrukturierungsverfahren ist die erreichbare Qualität immer noch eine große Herausforderung. Das Ziel der Untersuchungen besteht nun darin, den Einfluss der erneuten Ablagerung von Debris im Ablationsbereich

während des Strukturierungsprozesses zu verringern. Bei der zuletzt entwickelten Methode wird eine rotierende Maske verwendet, bei der die Ablagerungen vor den aktuellen Ablationsbereich und damit stets in den folgenden Ablationsbereich geschoben werden, was zu Unregelmäßigkeiten in der Struktur und ihrer Oberfläche führt [7]. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Strategie für die Linsenstrukturierung auf eine vollflächige Strukturierungsmethode umgestellt, bei der der Abtragsbereich schrittweise verkleinert wird und immer innerhalb des vorherigen Bereichs liegt. Daher befindet sich nach der Strukturierung fast kein Debris mehr innerhalb des Ablationsbereichs. Um diese sich allmählich verändernde Maskengeometrie zu erreichen, wird eine Kombination aus einem Satz kreisförmiger Masken sowie Kreisblenden verwendet.

2. Grundlagen und Methoden

2.1. Prozess

Das verwendete System besteht aus dem gepulsten Fluorlaser LPF 220i der Firma Coherent (Deutschland) GmbH und der Mikrobearbeitungsstation EX-157. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage ist in einer früheren Arbeit [8] enthalten, da das System identisch ist. Der Fluorlaser ist aufgrund seiner Strahlcharakteristik nicht für die direkt schreibende Strukturierung geeignet. Daher wird das Maskenprojektionsverfahren angewendet. Um die Laserpulsfluenz H gleichmäßig über die Maskenfläche zu verteilen, wird der Laserstrahl homogenisiert. So wird eine gleichmäßige Abtragstiefe erreicht, wenn die Laserpulsschwellfluenz des zu strukturierenden Materials überschritten wird. Diese hängt von der verwendeten Laserwellenlänge und der Laserpulsdauer ab. Der Fluorlaser emittiert Photonen mit einer Wellenlänge von 157 nm bei einer Pulsdauer von 25 ns. Die Wellenlänge, die einer Photonenenergie von 7,9 eV entspricht, ist für die Bearbeitung von hochtransparenten technischen Gläsern von besonderem Interesse. Die Differenz zwischen Photonenenergie und Energiebandlücke wirkt sich direkt auf die Verarbeitungsqualität aus. Je höher die Photonenenergie im Verhältnis zur Bandlückenenergie des zu strukturierenden Materials ist, desto besser

ist die Oberflächenqualität des Materials, da die Absorptionsbedingungen besser sind. Andererseits bestimmt die Energiebandlücke, welches optische Material als Maskenmaterial und Maskenträgermaterial im Laserstrahl für die entsprechende Wellenlänge des Lasers verwendet werden kann. Für das Ziel, eine ganzflächige Behandlung zu realisieren, ist eine Kombination mehrerer Masken und Kreisblenden erforderlich. Genauer gesagt soll ein ringförmiger Ablationsbereich mit variablen inneren und konstanten äußeren Radien geformt werden. Die Kreisaperturen des Maskenhalters definieren die Außenlinie des Ablationsbereichs und damit die Kontur der Mikrooptik. Der Innenradius des Ablationsbereichs wird durch einen Satz spezieller kreisförmiger Masken definiert. Die Herstellung der Masken wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.2. Maskenherstellung

Als Maskenträgersubstrat wurde Kalziumfluorid gewählt, da dieses Material aufgrund seiner hohen Energiebandlücke von 12,2 eV für die verwendete Laserwellenlänge transparent ist. Die 50 verwendeten Maskensubstrate haben einen Durchmesser von 5 mm und eine Dicke von 0,5 mm, um optische Verluste möglichst gering zu halten. Für die innere Begrenzung des ringförmigen Ablationsbereichs wird ein undurchsichtiger Bereich aus Tantal mittels Laserpulsabscheidung auf dem Maskensubstrat erzeugt. Dabei ist es wichtig, dass die Beschichtungsbereiche sehr präzise mittig auf dem Substrat positioniert werden. Für die Strukturierung von Mikrolinsen entsprechen diese Bereiche Kreisen mit unterschiedlichen Radien, die konzentrisch zum Substrat liegen müssen. Um die präzise Positionierung zu erreichen, wurde ein Maskenhalter für den Beschichtungsprozess entwickelt. Der Halter besteht aus drei Metallplatten: der Rückplatte, der Substrathalterplatte und der Frontplatte. Die Substrathalterplatte ist 0,5 mm dick und mit 56 Löchern von je 5 mm Durchmesser versehen, so dass die Kalziumfluoridsubstrate ideal in diese Löcher passen. Anders als die Rückplatte, ist die Frontplatte mit 56 Löchern von 4 mm Durchmesser versehen, um eine Seite der Substrate für die Beschichtung freizulegen. Um die Beschichtungsfläche zu verändern, wird eine zusätzliche dünne Tantalfolie zwischen die Substrathalter- und der Frontplatte gelegt und fixiert. In diese Folie wurden Löcher mit jeweils größer werdenden Durchmessern geschnitten. Alle drei Platten haben zusätzlich Befestigungs- und Justagelöcher für eine präzise Positionierung mit Hilfe von Passstiften, wodurch alle Beschichtungsgebiete konzentrisch zu den runden Substraten sind. Anschließend werden die Substrate im Halter mittels Laserpulsabscheidung beschichtet. Abbildung 1 zeigt die beschichteten Kalziumfluorid-Substrate. Aufgrund der Löcher in der Beschichtungsmaske (Tantalfolie) hat jeder Bereich einen individuellen Radius, so dass in der Bearbeitungsebene 50 verschiedene Abtragsgrößen mit einem Radius von 1 μm bis 50 μm in 1 μm -Schritten genutzt werden können.



Abbildung 1: 56 Kalziumfluoridsubstrate im Beschichtungshalter mit tantalbeschichteten Maskenbereichen. Frontplatte und Tantalfolie wurden entfernt.

2.3. Experimentaufbau

Der sequentielle Abtrag von Material mit unterschiedlichen Maskengeometrien erfordert den schnellen Wechsel der Masken im Laserstrahl. Hierfür wurde ein motorisiertes Maskenrad entwickelt (siehe Abbildung 2). Die beschichteten Substrate werden wiederum mit drei lasergeschnittenen Platten gehalten: eine Vorder- und eine Rückplatte mit Löchern von 4 mm Durchmesser und eine Zwischenplatte mit Löchern von 5 mm Durchmesser. Diese 4 mm großen Löcher sind für die Außenkontur jeder Mikrooptik verantwortlich und bilden somit die zuvor erwähnte Kreisapertur mit konstantem Radius. Die Löcher im Maskenrad befinden sich auf einem Kreis mit einem Radius von 50 mm.

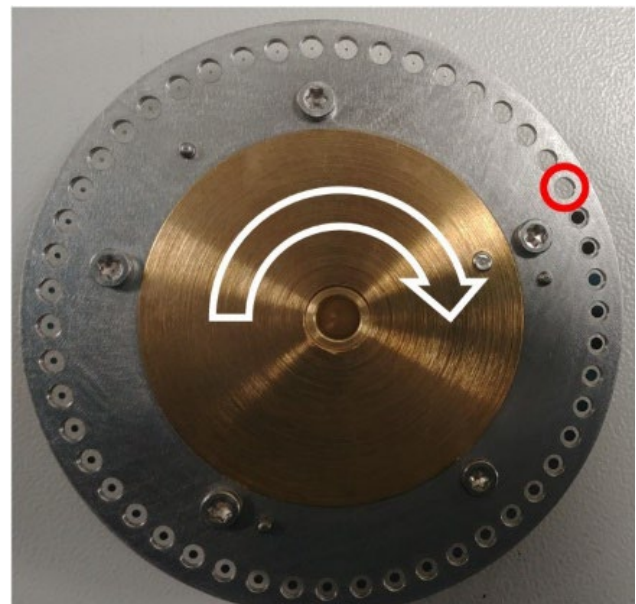


Abbildung 2: Maskenrad (roter Kreis: kleinste Maske, weißer Pfeil: Drehrichtung).

Das Maskenrad wird von einem Schrittmotor mit einem 33:1-Getriebe angetrieben. Der verwendete Motor-Encoder hat eine Genauigkeit von 4.000 Inkrementen pro 360°. Außerdem wird ein Hall-Sensor zur Referenzierung der Drehbewegung (Homing) benötigt, damit sich zum

Prozessbeginn stets die gleiche Maske im Laserstrahl befindet. Die gesamte Baugruppe wird auf einer Linearachse platziert (siehe Abbildung 3). Somit können die Masken auf die Position des Laserstrahls justiert werden.

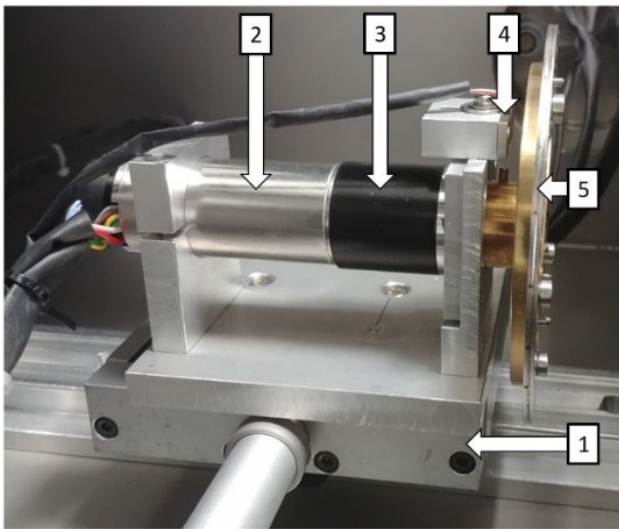


Abbildung 3: Experimentaufbau: Linearachse (1), Schrittmotor (2), 33:1 Getriebe (3), Hall-Sensor (4) und Maskenrad (5).

2.4. Berechnung der Prozessparameter

Es sind zwei unterschiedliche Prozessmethoden möglich. Bei Methode 1 wird während des Strukturierungsprozesses das Maskenrad mit einer Geschwindigkeit rotiert, die mit der Laserrepetitionsrate synchronisiert ist. Somit kann eine Mikrooptik in etwa 0,25 s fertiggestellt werden, wenn alle 50 Masken verwendet werden und der Laser mit seiner maximalen Pulswiederholrate von 200 Hz emittiert. Für diese Methode wird jedoch ein speziell für die zu strukturierende Mikrooptik angefertigter Maskensatz benötigt. Mit diesem Maskensatz wird eine industrielle Fertigung identischer Linsen ermöglicht. Bei Methode 2 wird die Drehbewegung an jeder Maskenposition gestoppt. Danach wird jeweils die für die Zielstruktur benötigte Anzahl an Laserpulsen emittiert. Aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremszeiten führt dies zu Bearbeitungszeiten von etwa einer Minute pro Mikrooptik, was deutlich langsamer als Methode 1 ist. Dafür ist diese zweite Methode flexibler, da eine Maske mehrfach verwendet werden kann und somit insgesamt mehr Masken mit verschiedenen Durchmessern im Maskenrad gehalten werden können. Da viele verschiedene Mikrolinsen strukturiert werden sollen, wird für diese Studie die zweite Methode verwendet. Die Anzahl der Laserpulse und der benötigte Maskensatz werden durch einen Soll-Ist-Vergleich berechnet. Der Ausgangspunkt jeder Berechnung ist der angestrebte Krümmungsradius, der die Form der Mikrolinse definiert sowie die Laserpulsfluenz, die die Abtragstiefe pro Laserpuls bestimmt. Da die Linse rotationssymmetrisch ist, kann die Berechnung auf zwei Dimensionen vereinfacht werden. Der Linsenmittelpunkt liegt immer bei $r = 0 \mu\text{m}$. Das Zielprofil wird dann mittels einer Kreisgleichung mit dem Ziel-Krümmungsradius berechnet.

Die Berechnung des tatsächlichen Profils beginnt mit dem Radiuswert $r_{m,1}$, der der ersten Maske im verwendeten Maskensatz entspricht. Die erforderliche Abtragstiefe z für jeden Maskenradius r_m ergibt sich aus der Differenz der Profiltiefe für den aktuellen Maskenradius zu der Profiltiefe für den vorherigen Maskenradius. Die entsprechende Anzahl der Laserpulse ergibt sich aus dem ganzzahlig gerundeten Verhältnis von benötigter Abtragstiefe und Abtragstiefe pro Laserpuls Δz . Das Ergebnis dieses schrittweisen Berechnungsverfahrens ist in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt.

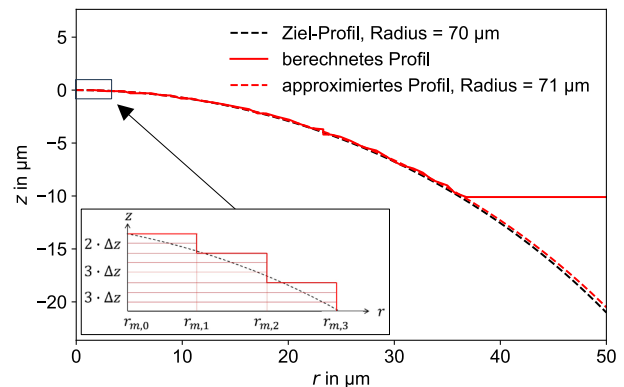


Abbildung 4: Beispielhaftes Ergebnis der Soll-Ist-Vergleichsrechnung für ein vorgegebenes Ziel-Profil.

3. Ergebnisse

Es werden Laserpulsfluenzen von $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ bis $2,0 \text{ J/cm}^2$ und Ziel-Radien von $50 \mu\text{m}$ bis $250 \mu\text{m}$ verwendet, um den optimalen Parametersatz für jede Zielstruktur zu ermitteln. Wie Abbildung 5 zeigt, sind prinzipiell mit dem beschriebenen Versuchsaufbau Mikrolinsen herstellbar.

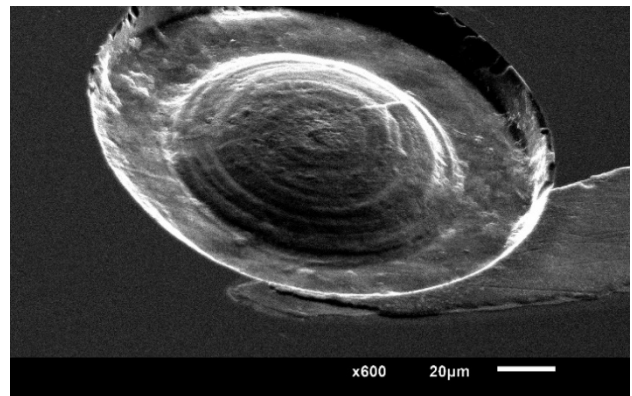


Abbildung 5: Rasterelektronenaufnahme einer Mikrolinse mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ und dem Zielkrümmungsradius $250 \mu\text{m}$.

Nach dem Strukturierungsprozess werden die Mikrolinsen mit einem Laser-Scanning-Mikroskop vermessen. Die Höhendaten werden dann mit einem Python-Programm analysiert, das eine Kugelfunktion an die Daten approximiert, wobei der Radius als variabler Approximationsparameter dient. Dieser Radius ist der „gemessene Radius“.

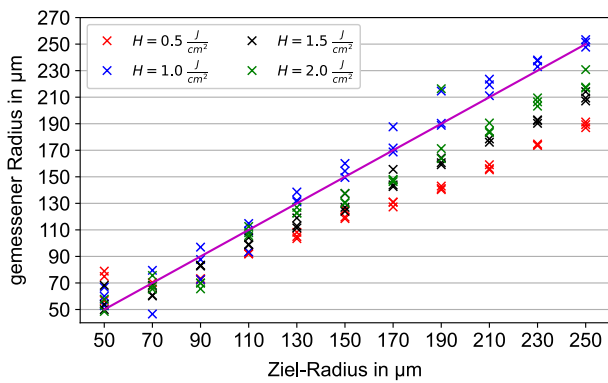


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen Radien der Linsenstrukturen mit den jeweiligen Ziel-Radien für verschiedene Laserpulsfluenszen. Die lila Linie zeigt den idealen Krümmungsradius.

Jeder Parametersatz wurde dreimal strukturiert, was theoretisch zu drei identischen Linsen führen sollte. Dies ist notwendig, um später eine Aussage über die Prozessstabilität treffen zu können. In den Abbildungen in diesem Kapitel stellt jeder Punkt jeweils das Ergebnis für eine Mikrolinse dar. Abbildung 6 zeigt, dass die gemessenen Radien der Strukturen mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ am wenigsten von dem Ziel-Radius abweicht, wobei eine Struktur aus jedem Parametersatz fast genau den Ziel-Radius aufweist. Für die anderen Laserpulsfluenszen ist der Radius deutlich kleiner. Das Verhältnis zwischen gemessenem und angestrebtem Radius bleibt für alle Parameterkombinationen annähernd konstant: $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$: 0,75; $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$: 0,84; $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$: 0,88. Diese konstanten Abweichungen deuten auf einen Fehler bei der Messung der Laserpulsfluensz hin, der durch Anwendung eines Korrekturfaktors für jede Laserpulsfluensz minimiert werden könnte. Dieser Faktor kann iterativ angepasst werden, indem eine Reihe von Linsen mit unterschiedlichen Ziel-Radien strukturiert und die Radiusabweichung berechnet wird.

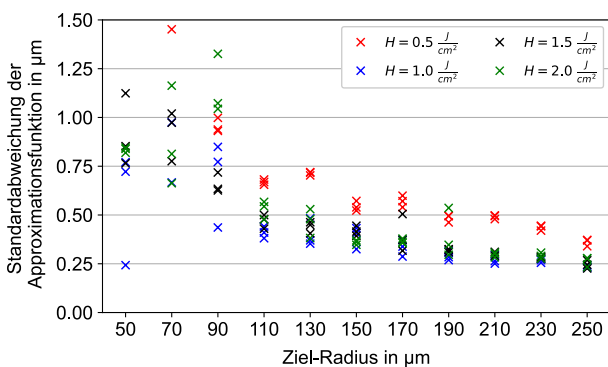


Abbildung 7: Standardabweichung der Approximationsfunktion für jede ausgewertete Linse.

Die Berechnung der Standardabweichung für jede approximierten Kugel, wie in Abbildung 7 dargestellt, kann als Indikator für die Formgenauigkeit jeder Linse verwendet werden. Es ist festzustellen, dass größere Ziel-Radien zu geringeren Standardabweichungen führen. Die mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ strukturierten Linsen weisen im Allgemeinen die geringsten Standardabweichungen auf,

was bedeutet, dass sie der Form einer idealen Kugel am besten entsprechen. Dann folgen die Linsen mit $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$ und $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$ mit etwas höheren Standardabweichungswerten. Die Linsen mit $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ weisen im Allgemeinen die höchsten Standardabweichungen auf. Da diese Linsen zusätzlich noch am weitesten vom Ziel-Radius entfernt sind, eignet sich die Laserpulsfluensz $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ nicht für die Strukturierung einsetzbarer Mikrolinsen. Kleine Werte des Ziel-Radius führen zu hohen Standardabweichungen, da diese Linsen dazu neigen, abzusplittern, wodurch sie als Optiken unbrauchbar sind. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel für eine solche Mikrolinse.

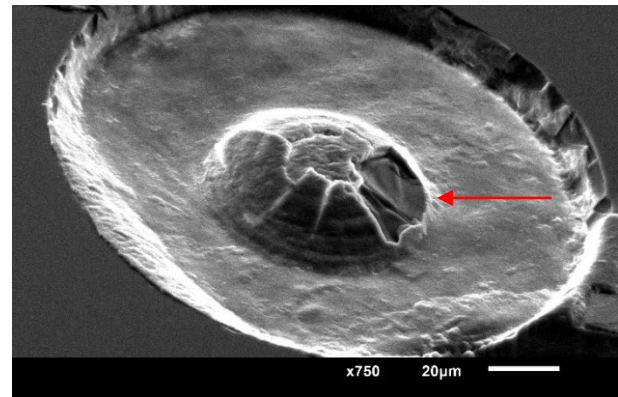


Abbildung 8: Rasterelektronenaufnahme einer Mikrolinse mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ und dem Zielkrümmungsradius $50 \mu\text{m}$. Der rote Pfeil zeigt auf die deutlich sichtbaren Abplatzungen.

Das Abplatzen ist auch der Grund für die gemessenen Radiusabweichungen für die kleinsten Ziel-Radien von $50 \mu\text{m}$ und $70 \mu\text{m}$, wie in Abbildung 9 dargestellt. Das Abplatzen tritt jedoch bei keiner Mikrolinse mit einem Ziel-Radius von $90 \mu\text{m}$ und größer auf. Mit dieser Strukturierungsmethode können demnach Mikrolinsen mit einem Krümmungsradius $\geq 90 \mu\text{m}$ hergestellt werden.

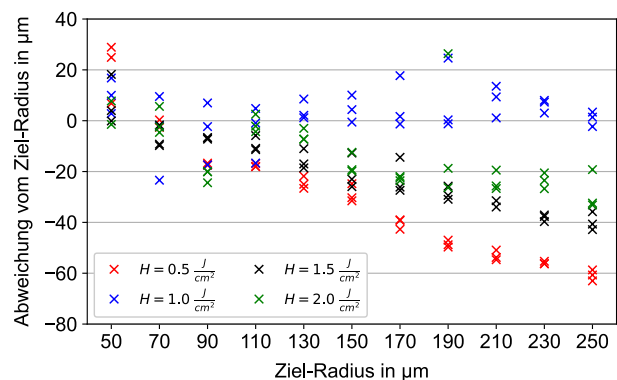


Abbildung 9: Abweichung des jeweils gemessenen Radius vom Zielradius für verschiedene Laserpulsfluenszen.

Abbildung 9 zeigt erneut, dass die Laserpulsfluensz von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ am besten für die Herstellung von Mikrolinsen geeignet ist, die einen bestimmten Ziel-Radius aufweisen sollen. Zur weiteren Analyse dieser Linsen im Hinblick auf die Wiederholgenauigkeit des Strukturierungsprozesses kann die Abweichung vom mittleren gemessenen Radius für jeden Ziel-Radius berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt. Die

Linsen mit einer Ziel-Radius von 70 μm und 190 μm weisen mit 18 μm bzw. 16 μm die größte Abweichung auf. Die geringste Abweichung tritt bei den Linsen mit den größten Ziel-Radius von 230 μm und 250 μm mit jeweils maximal 3 μm auf. Dies entspricht einer Abweichung vom mittleren gemessenen Radius von etwa 1%, was auf eine gute Wiederholbarkeit der Strukturierungsergebnisse für die entsprechenden Prozessparameter hindeutet.

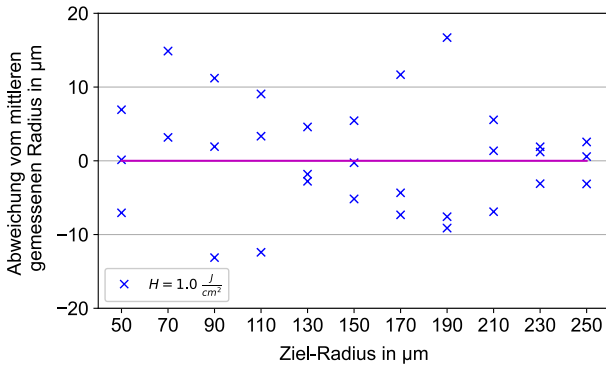


Abbildung 10: Abweichung vom mittleren gemessenen Radius für jeden Ziel-Radius bei einer Laserpulsfluenz von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$. Die lila Linie zeigt die ideale Abweichung von 0 μm .

Die Laserpulsfluenz von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ führt auch zu den insgesamt kleinsten mittleren quadratischen Rauheitswerten mit $S_q \approx 80 \text{ nm}$, wie in Abbildung 11 dargestellt. Dieser Wert wurde durch eine Faltung der Höhendaten mit einem Gaußfilter erhalten. Dabei wurde die Filterstandardabweichung so gewählt, dass sie einer definierten Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 8 \mu\text{m}$ entspricht. Für alle Linsen nimmt S_q mit zunehmendem Ziel-Radius ab. Ursache hierfür ist, dass für die Herstellung von Mikrooptiken mit einem größeren Radius weniger Laserpulse pro Maskenposition benötigt werden. Die Oberflächenrauheit für alle Ziel-Radius größer als 170 μm liegt generell unter 130 nm, was in Bezug auf die Design-Wellenlänge für die optische Datenübertragung von 1.310 nm gleich $\lambda/10$ ist.

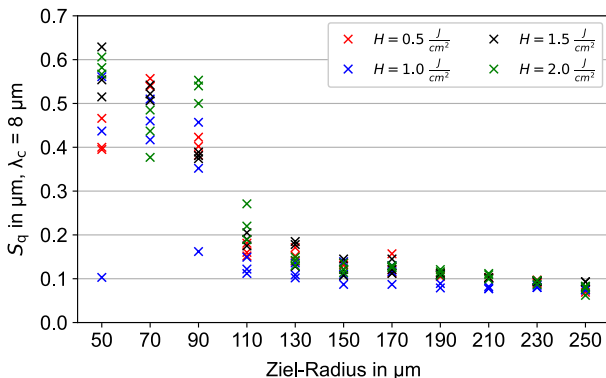


Abbildung 11: Berechnete Oberflächenrauheit S_q für jede strukturierte Linse.

Die Linsen mit der besten Formgenauigkeit wurden mit einer Laserpulsfluenz von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ strukturiert. Zur weiteren Analyse der Oberflächenrauheit können verschiedene Grenzwellenlängen λ_c für die Berechnung

verwendet werden, wie in Abbildung 12 mit $\lambda_c = (2,5; 8,0; 25) \mu\text{m}$ gezeigt. Je kleiner die Grenzwellenlänge ist, desto geringer ist die Rauheit. Für den Ziel-Radius von 250 μm betragen die drei Rauheitswerte für die entsprechenden Grenzwellenlängen von (2,5; 8,0; 25) μm jeweils (38; 74; 172) nm. 38 nm liegt unter $\lambda/30$ bezogen auf die Designwellenlänge.

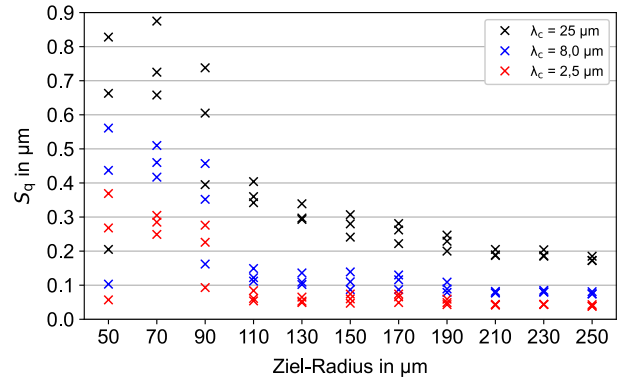


Abbildung 12: Mit verschiedenen Grenzwellenlängen berechnete Oberflächenrauheit S_q für jede mit $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ strukturierte Linse.

Eine weitere Möglichkeit, jeder Struktur einen Rauheitswert zuzuordnen, ist bereits in Abbildung 7 durch die Standardabweichung jeder Approximationsfunktion gegeben. Diese Werte können als Oberflächenrauheit interpretiert werden, die übrig bleibt, wenn die ideal angepasste Linsenform als Welligkeit von den gemessenen Höhendaten subtrahiert wird, da die Formel für die Standardabweichung der Formel für die Oberflächenrauheit entspricht. Diese Rauheitswerte beziehen sich jedoch nicht auf eine bestimmte Grenzwellenlänge, sondern sind vielmehr ein Hinweis auf den Wellenfrontfehler, den eine ebene Welle beim Durchgang durch die Mikrolinse erhalten würde.

Letztlich hängt die Berechnung und der zu erreichende Wert der Oberflächenrauheit von der Anwendung ab, für die die Mikrooptik eingesetzt werden soll.

Hinsichtlich einer Prozessoptimierung gibt es zwei mögliche Ansatzpunkte. Erstens wurde bei der Auswertung der erzeugten Mikrooptiken eine Abweichung der Positionierung der einzelnen Masken zueinander festgestellt, wie beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt. Dieser Fehler kann auf ein Getriebespiel im Motor zurückzuführen sein, das durch einen Umbau des Motorencoders direkt auf das Maskenrad behoben werden könnte. Der Fehler kann auch durch einen Ausrichtungsfehler bei der Herstellung des Maskenrads oder bei der Befestigung des Maskenrads an der Motorachse verursacht werden. Beides könnte dazu führen, dass die Masken nicht konzentrisch zur Motorachse positioniert sind, was die Fehlausrichtung der Masken erklären würde. Die Lösung dieses Problems würde zu Linsen führen, die besser der idealen Kugelform entsprechen und gleichzeitig auch glatter sind, je nachdem, welche Methode zur Berechnung der Rauheit verwendet wird.

Zweitens verliert der Fluorlaser langsam an Leistung, wenn er nicht mit seiner nominalen Pulsfrequenz von 200 Hz emittiert. Da das Maskenrad an jeder Maskenposition stoppt, bis die erforderliche Anzahl von Laserimpulsen emittiert wurde, liegt die effektive Pulsfrequenz weit unter 200 Hz.

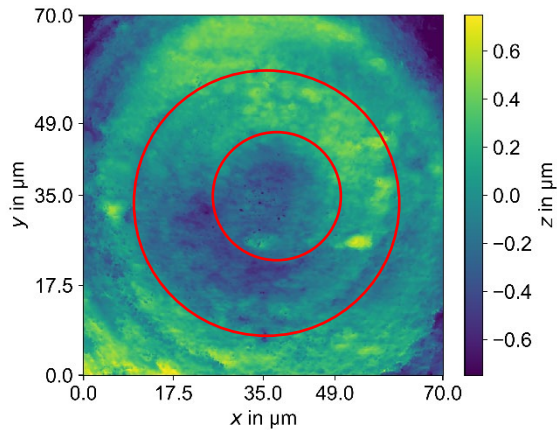


Abbildung 13: Fehler bei der Ausrichtung der einzelnen Masken zueinander. Die roten Kreise zeigen jeweils die innere Kante zweier Ablationsbereiche, die nicht ideal konzentrisch sind.

Sobald ein optimaler Parametersatz für einen geforderten Ziel-Radius gefunden wurde, besteht der nächste Schritt darin, die Gesamtprozesszeit zu reduzieren, indem der verwendete Maskensatz entsprechend auf die

Ziel-Linsengeometrie optimiert wird. Dadurch sollen die effektive Pulsfrequenz erhöht und die lokalen Abweichungen von der idealen Linsenform weiter verringert werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination von sequentieller Maskenprojektion und Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser ermöglicht die Herstellung von rotationssymmetrischen Mikrooptiken. Zu diesem Zweck wurde ein Experimentaufbau mit einem rotierenden Maskenrad konzipiert und gebaut. Unter Vorgabe der Laserpulsfluenz und eines Strukturparameters, wie z.B. dem Zielkrümmungsradius einer Linsengeometrie, wird die erforderliche Maskensequenz und die Anzahl der Laserpulse pro Maske berechnet. Die Auswertung der mit diesen Parametern erzeugten Strukturen zeigt, dass die Berechnungsmethode prinzipiell zum Erreichen der Zielgeometrien führt. Die gemessenen Radien der mit einer Laserpulsfluenz von $H = 1,0 \text{ J/cm}^2$ hergestellten Mikrolinsen weichen nur gering vom jeweiligen Zielradius ab, wobei eine Struktur aus jedem Parametersatz nahezu exakt dem vorgegebenen Zielradius entspricht. Die Oberflächenrauheit S_q dieser Strukturen nimmt mit größerem Zielkrümmungsradius ab, wobei die kleinsten S_q -Werte bei etwa 80 nm liegen.

Literaturverzeichnis

- [1] Moore, S., Gomez, J., & Lek, D. (2016): Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique, in: *Microelectronic Engineering*, 162, 57–62.
- [2] Bückmann, T., Schittny, R., Thiel, M., & Kadic, M. (2014): On three-dimensional dilational elastic metamaterials, in: *New Journal of Physics*, 16(3).
- [3] Kim, J. Y., Brauer, N. B., Fakhfour, V., & Boiko, D. L. (2011): Hybrid polymer microlens arrays with high numerical apertures fabricated using simple ink-jet printing technique, in: *Optical Materials Express*, 1(2), 259.
- [4] Hua, J.-G., Liang, S.-Y., Chen, Q.-D., Juodkazy, S., & Sun, H.-B. (2022): Free-Form Micro-Optics Out of Crystals: Femtosecond Laser 3D Sculpturing, in: *Advanced Functional Materials*, 32(26).
- [5] Zhao, L., Cheng, J., Yin, Z., Yang, H., Liu, Q., Tan, C., et al. (2022): Rapid CO₂ laser processing technique for fabrication of micro-optics and micro-structures on fused silica materials, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(1-2), 100–110.
- [6] Sohn, I.-B., Choi, H.-K., Noh, Y.-C., Kim, J., & Ahsan, M. S. (2019): Laser assisted fabrication of micro-lens array and characterization of their beam shaping property, in: *Applied Surface Science*, 479, 375–385.
- [7] Buettner, S., Pfeifer, M., & Weissmantel, S. (2020): Fabrication of Micro Spiral Phase Plates in Fused Silica using F2-Laser Microstructuring, in: *PHOTOPTICS 2020* (pp. 114–121). Setúbal, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications Lda.
- [8] Buettner, S., Pfeifer, M., & Weissmantel, S. (2019): Manufacturing of Cylindrical Micro Lenses and Micro Lens Arrays in Fused Silica and Borosilicate Glass using F2-Laser Microstructuring, in: *PHOTOPTICS 2019* (pp. 66–72). Setúbal, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications Lda.