

# Herstellung von Mikrogittern in optischen Gläsern mittels Ultrakurzpulslaserablation

C. Warneke\*, J. Kuhl\*, I. Lebershausen\*, F. Völklein\*, S. Kontermann\*

\*Institut für Mikrotechnologien Hochschule RheinMain

mailto: Stefan.Kontermann@hs-rm.de

Es werden Koppelgitter im Mikro- und Nanometerbereich mittels UKP-Laserablation realisiert und auf ihre optischen Eigenschaften untersucht. Die so erzeugten Gitter weisen eine Gitterkonstante von  $2\ \mu\text{m}$  und eine Probengröße von  $(30 \times 30)\ \mu\text{m}^2$  auf. Die absolute Probengröße ist vom Verfahren unabhängig makroskopisch skalier- und formbar. Die genutzten Strahlparameter sind Pulsdauer  $t_p = 100\ \text{fs}$ , Repetitionsrate  $f_r = 10\ \text{kHz}$  und Leistung  $P = 1.025\ \text{W}$ .

## 1 Einleitung

Im Herstellungsprozess, der für die Wellenleiter-Evaneszenzfeld-Fluoreszenz-Mikroskopie [1] benötigten Wellenleiter, müssen Gitterstrukturen im Mikro- und Nanometerbereich gefertigt werden. Die Koppelgitter haben typischerweise eine Gitterkonstante von  $\Lambda = 600\ \text{nm}$  und werden mittels aufwändiger UV-Laserlithographie hergestellt [2].

Im Folgenden wird die Umsetzbarkeit solcher Koppelgitter auf „HEBO FQVIS2“ Quarzglas durch Ablation mit Femtosekundenlaserpulsen untersucht. Es werden Gitter im Raster-Verfahren geschrieben und mit im UV-Laserlithographie-Verfahren hergestellten Referenzproben in Bezug auf Gitterkonstante, Gitteramplitude und optische Nutzbarkeit verglichen.

## 2 Experiment

Als Strahlquelle für das Rasterverfahren dient ein modular aufgebautes fs-Lasersystem von Spectra-Physics. Das System besteht aus dem Seedlaser „Mai Tai“, einem „Ascend 60“ als Pumplaser und einem „Spitfire Ace“ als Verstärker. Die Strahlführung nach dem Lasersystem ist mit einem Light-Fab Hochgeschwindigkeits-Mikroscanner mit integriertem x-y-z-Tisch für die Positionierung der Proben realisiert. Zur Herstellung der Mikrostrukturen wird die Probe zunächst in Simple Green gereinigt und auf dem x-y-z-Tisch des Laserscanners positioniert. Hierbei wird eine Ecke der Glasprobe über dem Rotationspunkt (Fixpunkt) des Tisches positioniert. Durch Verkippen des Probentisches um die x- und y-Achse kann die Oberfläche der Probe in der Fokusebene des Scanners ausgerichtet werden.

Material	Ablationsschwelle $I_{th}$ ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
SF11	$1.6 \cdot 10^{13}$
Corning 0211	$2.8 \cdot 10^{13}$
Quarzglas	$3.2 \cdot 10^{13}$
$\text{CaF}_2$	$4.3 \cdot 10^{13}$

**Tabelle 1** Schwellenintensität in transparenten Gläsern  $I_{th}$  ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) [3].

Vor dem eigentlichen Strukturierungsprozess wird die für das Material notwendige minimale Fluenz mit einer Testreihe aus einzelnen Gitterlinien experimentell bestimmt. Hierbei wird sich für die Ablationsschwelle an den Werten von Schaffer [3] aus Tabelle 1 orientiert. Die maximale Schreibgeschwindigkeit, bei der noch durchgehende Strukturen entstehen und die Pulscharakteristik des Lasers nicht sichtbar wird, wird ebenfalls anhand einer Testreihe ermittelt. Dies ist notwendig, da durch Fokussierungsfehler der Strahldurchmesser und somit auch die maximale Verfahrgeschwindigkeit von der Theorie abweichen kann. Die verwendeten Strahlparameter sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

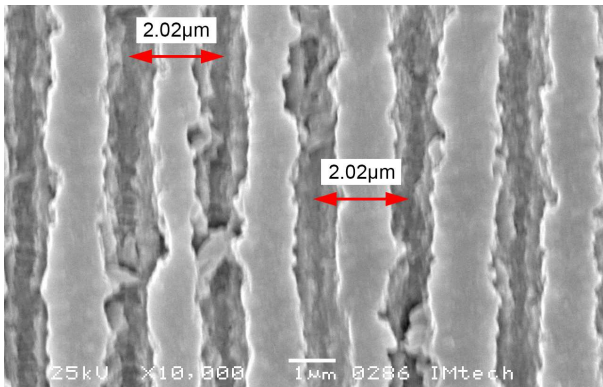
Parameter	Symbol	Wert
Pulsdauer (fs)	$t_p$	100
Repetitionsrate (kHz)	$f_r$	10
Leistung am Laserausgang (W)	$P$	1.025
Schwellenintensität ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	$I_{th}$	$3,2 \cdot 10^{13}$
Geschwindigkeit (m/s)	$v(x, y)$	$3 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 2** Prozessparameter des UKP-Rasterverfahrens in „HEBO FQVIS2“ Quarzglas

Zusätzlich zu den allgemeinen Gittertests wird versucht die Strukturgröße durch Defokussierung des Lasers zu verringern. Ausgehend von der gaußförmigen Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt wird durch die Defokussierung die Ablationsschwelle nicht mehr im gesamten Strahlquerschnitt überschritten, was zu kleineren Strukturen führt.

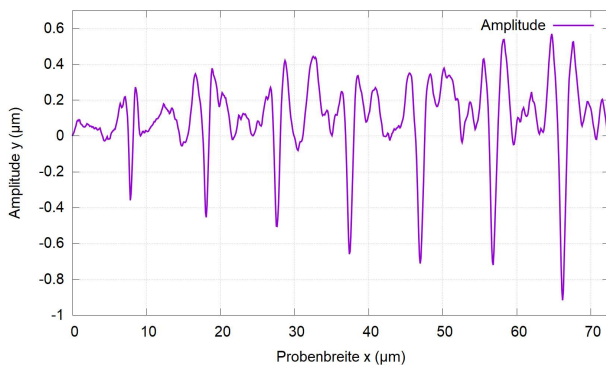
## 3 Ergebnisse

Der beschriebene Prozess ermöglicht Gitter mit einer Gitterkonstanten im Bereich von  $\Lambda = 2 - 5\ \mu\text{m}$ . Die Untersuchung der Gitter mit  $\Lambda = 2\ \mu\text{m}$  auf die typischen diffraktiven Eigenschaften zeigen das typische Beugungsbild mit sehr geringem Streulichtanteil in den Minima des Beugungsmusters. Eine REM-Aufnahme der Probe mit einer Gitterkonstanten von  $\Lambda = 2\ \mu\text{m}$  ist in Abbildung 1 zu sehen.



**Abbildung 1** REM-Aufnahme des im UKP-Rasterverfahren geschriebenen Gitters mit  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ .

Im Folgenden zeigen die Testreihen mit einzelnen Linien bei unterschiedlichem Defokussierungsgrad der Oberfläche, dass die Strukturen weiter verkleinert werden können. Als Referenz für das Experiment dient eine Linie, die mit fokussierter Probenoberfläche geschrieben ist. In dieser Konfiguration tauchen alle Anteile des gaußförmigen Strahlprofils in die Probenoberfläche ein und tragen zur Ablation bei. Im Gegengensatz dazu wird bei zunehmender Defokussierung der in die Probe eintauchende Anteil, der oberhalb der Ablationsschwelle liegt, stetig geringer.



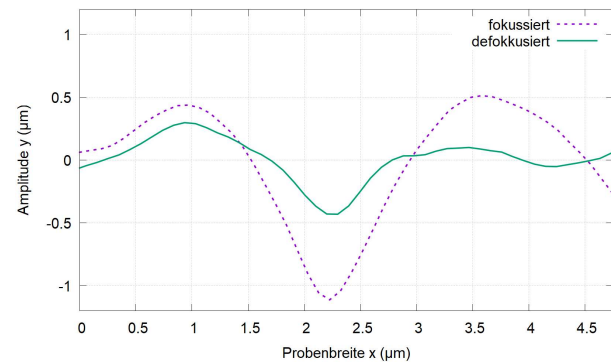
**Abbildung 2** AFM-Analyse des im UKP-Rasterverfahren geschriebenen Linientests mit von links nach rechts abnehmender Defokussierung,  $f = 2 \text{ Hz}$  im Kontaktmodus.

Damit verbunden sinkt ebenfalls die Strukturgröße bis die Intensität nicht mehr zur Ablation ausreicht. Abbildung 2 zeigt dieses abnehmende Verhalten mit von links nach rechts abnehmender Defokussierung der Probenoberfläche. Die Daten sind mit Gwyddion aufgearbeitet und über 128 Schnittlinien gemittelt. Der Vergleich von Referenzlinie und maximal defokussierter Linie ist in Abbildung 3 zu sehen. Über

$$s = \frac{s_f}{s_{df}} \quad (1)$$

kann der Verkleinerungsfaktor  $s$  anhand der Strukturweite bei fokussierter Oberfläche  $s_f$  und der bei defokussierter Oberfläche  $s_{df}$  ermittelt werden. In diesem Fall ergibt sich  $s = 0.7$ . Ebenfalls zu be-

obachten ist, dass die Tiefe der Gräben durch die Defokussierung abnimmt.



**Abbildung 3** Profilvergleich von fokussierter und maximal defokussierter Linie. Werte über 128 Schnittlinien gemittelt.

Der Vergleich der Proben des UKP-Rasterverfahrens mit solchen, die mit UV-Laserlithographie hergestellt sind, zeigt eine deutliche Steigerung der Amplitude von  $A = 40 \text{ nm}$  auf  $A = 0.4 - 1.2 \mu\text{m}$ . Die im UKP-Rasterverfahren rechnerisch minimal mögliche Gitterkonstante von  $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$  ist jedoch mehr als doppelt so groß wie die in der Anwendung benötigten  $\Lambda = 600 \text{ nm}$ . In diesem Punkt besteht ebenso wie in der Qualität der optischen Oberfläche weiterer Optimierungsbedarf.

#### 4 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt die Machbarkeitsstudie für Koppelgitter auf HEBO FQVIS2 Quarzglas durch fs-Laserablation, dass Gitter mit  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$  gefertigt werden können und optisch nutzbare Proben liefern. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass die Defokussierung der Probenoberfläche eine Verkleinerung der Struktur auf 70% der Ausgangsgröße ermöglicht. Tests zur minimalen Strukturgröße des Verfahrens stehen aus. Die maximale Amplitude der Gitter auf HEBO FQVIS2 Quarzglas kann von  $A = 40 \text{ nm}$  auf maximal  $A = 1.2 \mu\text{m}$  um das 30 fache gegenüber dem UV-Laserlithographie-Verfahren gesteigert werden.

#### Literatur

- [1] F. Fleissner, "Distance determination of fluorescent dye via WEFF Microscopy," Master thesis, Hochschule RheinMain in cooperation with the Western University, Rüsselsheim (09. Juni 2013).
- [2] I. Lebershausen, "Herstellung planarer Wellenleiter zur Erzeugung evaneszenter Felder für die WEFF-Mikroskopie," Bericht berufspraktische Tätigkeit, Hochschule RheinMain, Rüsselsheim (2016).
- [3] C. B. Schaffer, A. Brodeur, and E. Mazur, "Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses," Measurement Science and Technology **12**(11), 1784–1794 (2001).