

Diffraktive Effekte an additiv gefertigten optischen Elementen

M. Rank*, A. Horsak, M. Kudlek, J. Nuding, S. Pekrul und A. Heinrich

*Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen, Anton-Huber-Straße 21, 73430 Aalen

<mailto:manuel.rank@hs-aalen.de>

Additive manufacturing is based on building an object layer by layer. In case of 3D printed optical elements, this layered structure can cause diffractive effects. For Multi-Jet-Modeling a line with maxima and minima can be observed while a DMD-SLA printer creates a grid pattern. The diffractive effects are quantized and simulated to check their origin in the printing technology and materials.

1 Einführung

Additive Fertigungstechnologien werden bei mechanischen Komponenten schon länger eingesetzt. Lage für Lage wird das gewünschte Bauteil aufgebaut. Während die additive Fertigung bei mechanischen Teilen üblich ist, ist der 3D-Druck bei optischen Elementen immer noch neu. So gibt es bei bestehenden Verfahren Einschränkungen bzgl. senkrechten oder hohlen Strukturen [1]. Völlig neue Designansätze für optische Komponenten sind per Multi-Jet-Modeling-Verfahren (MJM) möglich, da hier mithilfe eines wasserlöslichen Stützmaterials überhängende Strukturen und Hohlräume gedruckt werden können [2].

Verwendet man einen Laser um ein Beleuchtungsdesign zu testen, kommt es je nach Drucktechnologie und Ausrichtung des Laserstrahls zur Lagenstruktur zu unterschiedlichen Lichtverteilungen bzw. zu diffraktiven Effekte. Dieses Phänomen soll in diesem Bericht analysiert und beschrieben werden.

2 Beobachtung und erste Analyse

Der diffraktive Effekt bei der Durchleuchtung von 3D-gedruckten Proben mit einem Laser unterscheidet sich bei unterschiedlichen Druckverfahren. Bei MJM-Proben kommt es primär zur Streuung, wenn der punktförmige Laserstrahl senkrecht zu den einzelnen Lagen der Probe steht. Bei paralleler Ausrichtung von Lagen und Laser kommt es zu einer länglichen Lichtverteilung senkrecht zur Lagenstruktur. Erste Untersuchungen der Oberfläche mithilfe eines Weißlichtinterferometers zeigen wellenartige Strukturen über mehrere Lagen hinweg. Die Annahme, dass es durch die Struktur zu einer zylinderlinsenähnlichen Aufweitung kommt, wird dadurch widerlegt, dass der Effekt nach manueller Politur bestehen bleibt. Die anfänglich nur schwach ausgeprägten Helligkeitsschwankungen entlang der Linie stellen sich, wie in **Abb. 1** zu sehen, als Maxima heraus, sodass ein diffraktiver Effekt nahelegend ist.

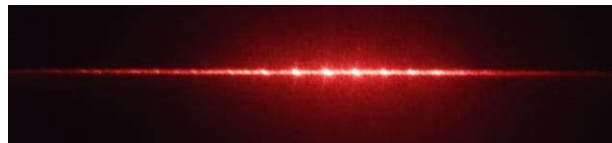


Abb. 1 Beugungsmuster einer MJM-Probe

Beim MJM-Verfahren wird ein UV-aushärtendes Harz mit einem Druckkopf lokal aufgetragen und mit einer UV-Lampe global ausgehärtet. Eine plausible Erklärung für den Beugungseffekt ist daher die Verbindung der Schichten zueinander, bspw. indem der Aushärtegrad an der Grenzfläche einer Lage von dem der restlichen Schicht abweicht.

Während der Aushärtung der Materialien verändern sich mit den mechanischen Eigenschaften auch die optischen Eigenschaften. So zeigt Tabelle 1, dass der mit einem Abbe-Refraktometer gemessene Brechungsindex n_D im ausgehärteten bzw. festen Material höher ist als im flüssigen Zustand.

Tabelle 1 Brechungsindizes n_D für verschiedene 3D-Druckharze

Material	Brechungsindex flüssig	Brechungsindex fest
MJM	1,4873	1,5116
SLA 1	1,4761	1,5091
SLA 2	1,4947	1,5232

Ein unterschiedlicher Brechungsindex im voll oder nur halb ausgehärteten Material könnte ein Phasengitter zur Folge haben. Ein Transmissionsgitter ist durch Helligkeitsunterschiede an den Grenzflächen zwischen zwei Schichten auch denkbar. Lokal aufgelöste Messungen der Transmissionsunterschiede stehen derzeit noch aus.

Die Analyse des Beugungsmusters auf einem Schirm bzw. mit einem Winkelmessplatz ergibt für die MJM Proben (Keyence Agilista) eine Gitterkonstante von ca. 40 μm . Dies deckt sich mit Profilmessungen der Drucklagen.

3 Simulation

Mit Hilfe eines Winkelmessplatzes wurde ortsaufgelöst die Intensitätsverteilung aufgenommen. An die Messdaten zum Beugungsmuster wird in MATLAB® die Multispaltformel (1) [4] angefügt, um den Effekt detaillierter zu betrachten.

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \quad (1)$$

Vor allem die Information aus der Einhüllenden des Einzelspaltes kann aus den Parametern der Formel extrahiert werden. Der Fit mit visualisierter Einzelspalteinhüllenden ist in Abb. 2 dargestellt. Daraus ergibt sich eine Einzelspaltbreite von ca. 15 µm, also etwas kleiner als die halbe Gitterkonstante. Diese Abweichung von der gemessenen Lagendicke (40µm) kann mit dem Ablauf des Beschichtungsprozesses erklärt werden.

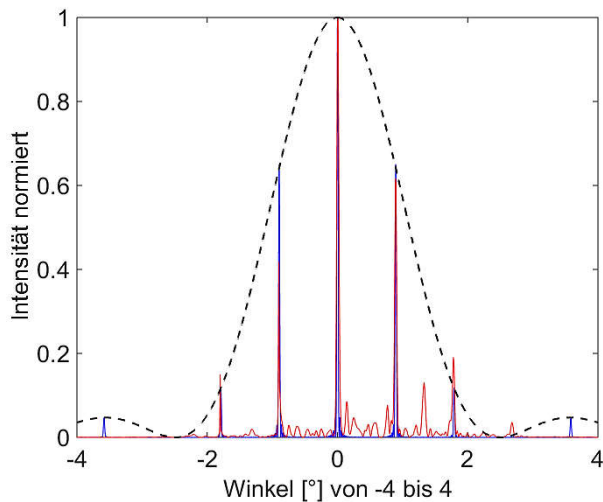


Abb. 2 Vergleich der Messdaten (rot) zur Simulation (blau) nach der Multispaltformel mit visualisierter Einhüllenden (schwarz gestrichelt)

4 Anwendungsmöglichkeiten

Eingesetzt kann die linienförmige Lichtverteilung an MJM-Proben zur Lasertriangulation. Mittels 3D-Druck können angepasste Abtastprofile zur Ausleuchtung von Hinterschnitten entwickelt und gefertigt werden. Der große Vorteil der additiven Fertigung ist die Anpassbarkeit an komplexe Geometrien sowie dass auch einzelne Sensoren ohne Massenfertigung realisiert werden können.

5 Diffraktive Effekte bei DMD-SLA-Proben

Eine weitere Drucktechnologie im 3D-Druck ist die Stereolithographie (SLA), bei der das Harz in einem Becken von einem Laser oder über einen DMD-Projektor lokal belichtet bzw. ausgehärtet wird. Bei einer DMD-SLA Probe kann ebenfalls ein diffraktiver Effekt festgestellt werden. Anders als bei MJM-Proben entsteht ein Punktemuster, abgebildet in Abb. 3 oben links, wenn ein Laserstrahl senkrecht

zu den Lagen ausgerichtet ist. Das Weißlichtinterferometer zeigt wie in Abb. 3 rechts zu sehen die Pixelstruktur des DMDs. Auch hier bleibt der Effekt nach einer Politur bestehen. Die am Schirm ermittelte Gitterkonstante von 50 µm deckt sich dabei mit der Datenblattangabe, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die im Übergangsbereich zwischen den Pixel reduzierte Bestrahlungsstärke bei der Aushärtung verantwortlich für die Entstehung der Beugung ist. Mit der Simulation auf Basis der Rayleigh-Sommerfeld-Beugung [5], siehe Abb. 3 unten links, konnten erste qualitative Vergleiche hergestellt werden. Für die DMD-SLA-Proben muss die Streuung noch deutlich reduziert werden, um etwaige Zwischenmaxima detektieren zu können. Der Vorteil der DMD-SLA-Technologie ist, dass der Projektor justiert werden kann, sodass mit einem gezielten Defokus im Bauraum durch eine verwischene Pixelabbildung der diffraktive Effekt verhindert werden kann.

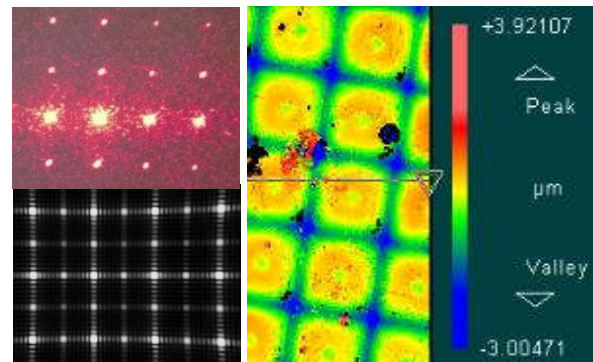


Abb. 3 Oben links: Punktemuster an einer DMD-SLA-Probe; unten links: Simulation des Punktemusters; rechts: Oberfläche unter dem Weißlichtinterferometer

6 Zusammenfassung

Proben die per MJM oder DMD-SLA gefertigt wurden, zeigen diffraktive Effekte parallel bzw. senkrecht zur Lagenstruktur. Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass veränderte optische Eigenschaften durch die Aushärtung bzw. lokal unterschiedliche Aushärte- bzw. Polymerisationsgrade für den Effekt verantwortlich sind. Simulationen helfen dabei über geeignete Parameterwahl, den Effekt besser zu verstehen.

Literatur

- [1] Luxexcel Group, „Design Guidelines ver.7.0“, 2015
- [2] A. Heinrich et al., „Additive manufacturing of optical components“ in: Adv. Opt. Techn. 2016 Volume 5 Issue 4: 293-301
- [3] KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH, „AGILISTA-3200W/3110W Technische Daten“, 2015
- [4] E. Hecht, „Optik“, 6. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2014, S. 747
- [5] I. Cooper, „Rayleigh-Sommerfeld Diffraction Rectangular Apertures“, University of Sidney